

**Международная конференция**  
**«СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ»**  
(Октябрь 2000 г., Киев)  
**Тезисы стендовых докладов**

**International Conference**  
**«WELDED STRUCTURES»**  
(October 2000, Kyiv)  
**Abstracts of poster papers.**



**Киев 2000 Kyiv**

**20011203 227**

*Спонсоры конференции*

*Министерство образования и науки Украины  
Президиум Национальной академии наук Украины  
Office of Naval Research International Field Office (UK)  
USAF European Office of Aerospace Research and Development*

*Sponsors of the conference*

*Ministry of Education and Science of Ukraine  
Presidium of the National Academy of Science of Ukraine  
Office of Naval Research International Field Office (UK)  
USAF European Office of Aerospace Research and Development*

**U.S. Government Rights License**

This work relates to Department of the Navy  
Grant or Contract issued by Office of Naval  
Research (ONR) International Field Office-  
Europe. The United States Government has a  
royalty-free license throughout the world in all  
copyrightable material contained herein.

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
◇  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА  
◇  
МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО СВАРКЕ  
И РОДСТВЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ  
◇  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ «СВАРКА»  
◇  
ОБЩЕСТВО СВАРЩИКОВ УКРАИНЫ

**Международная конференция  
«СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ»**

*(Октябрь 2000 г., Киев)*

**Тезисы стендовых докладов**

**УДК 621.791.001.12/.18**

**СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ** (Киев, октябрь 2000 г.): Тез. стенд. докл. / НАН Украины. Ин-т электросварки им.Е.О.Патона. — Киев, 2000. — 170 с.

Представлены тезисы стендовых докладов международной конференции «Сварные конструкции», в которых отражены научные достижения за последние годы в области сварки и родственных технологий. Рассмотрены вопросы прочности, контроля качества, технической диагностики и оценки остаточного ресурса сварных конструкций, сертификации продукции сварочного производства и аттестации специалистов.

**Международная конференция**

**«СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ»**

**(Октябрь 2000 г., Киев)**

**Тезисы стендовых докладов**

*Редактор В. И. Котляр*

*Электронная верстка Н. Н. Кравченко*

© ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000

**СВАРНЫЕ  
КОНСТРУКЦИИ,  
ПРОЧНОСТЬ  
СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ**

**WELDED  
STRUCTURES,  
STRENGTH  
OF WELDED JOINTS**

AQ F02-02-0273

**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)		2. REPORT DATE 2000	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED October 2000 Final Report	
4. TITLE AND SUBTITLE International Conference "Welded Structures." Held in Kiev, Ukraine on October 2000. Abstracts of Poster Papers.			5. FUNDING NUMBERS	
6. AUTHOR(S)				
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)			8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)  Office of Naval Research, European Office PSC 802 Box 39 FPO AE 09499-0039			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER	
11. SUPPLEMENTARY NOTES In Russian and English. This work relates to Department of the Navy Grant issued by the Office of Naval Research International Field Office. The United States has a royalty free license throughout the world in all copyrightable material contained herein.				
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT  Approved for Public Release; Distribution Unlimited. U.S. Government Rights License. All other rights reserved by the copyright holder.			12b. DISTRIBUTION CODE  A	
12. ABSTRACT (Maximum 200 words)  This volume contains abstracts in Russian with their English translations for papers presented at the International Conference on "Welded Structures" held in Kiev, Ukraine in October 2000. Conference session topics include: strength of welded joints; quality control, technical diagnostics and evaluation of residual life of welded structures; technologies, equipment and materials for welding, surfacing, brazing, cutting and coating; and, certification of products of welding industry and attestation of specialists.				
13. SUBJECT TERMS ONR, Foreign reports, Conferences, Russian language; Welded structures			15. NUMBER OF PAGES	
			16. PRICE CODE	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT  UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT  UNCLASSIFIED	20. LIMITATION OF ABSTRACT  UL	

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)  
Prescribed by ANSI Std. Z39-18  
298-102

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ.** В. В. Аладинский, В. О. Маханев, В. Л. Мельников (Рос. гос. науч. центр «НПО ЦНИИТМАШ», г. Москва, РФ). Межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением (МККРН) сварных узлов из стабилизированной нержавеющей стали — относительно новое явление, обнаруженное на трубопроводах атомных электростанций. Такого типа трещинообразование было впервые выявлено в Германии, затем в России, а также на трубопроводах третьего блока Чернобыльской атомной станции, изготовленных из стабилизированной титановой стали 18Cr10Ni.

Признано, что, кроме химии воды, на процессы МККРН оказывает влияние и сварка. Обсуждаются результаты моделирования методом конечных элементов, выполненного с целью определения характерных особенностей напряженно-деформированного состояния, вызванного сваркой, которое определяет склонность металла сварного узла к МККРН.

Представленные результаты касаются сварных соединений трубопровода в замкнутом цикле, внешний диаметр которого 325 мм, а номинальная толщина стенки 16 мм. Были исследованы сварные кольцевые соединения с U- и T-образной разделкой. U-образную разделку под углом 20° использовали на атомных реакторах РБМК в бывшем СССР. T-образная разделка является примером технологии сварки в узкий зазор, обеспечивающей сокращение объема металла шва. Моделировались варианты наложения слоев с дополнительным поперечным колебанием дуги (U- и T-образная разделка кромок сварных узлов) и с наложением валиков (U-образная разделка).

Моделирование не дало возможности установить существенное снижение остаточных растягивающих напряжений на внутренней поверхности трубы при использовании вариантов с небольшим объемом наплавленного металла.

Многими исследователями отмечалось отрицательное влияние пластической деформации на стойкость к коррозии аустенитных сталей. В процессе сварки основной металл, прилегающий к линии плавления, претерпевает пластические деформации — имеет место неизоэтермическая малоцикловая усталость. Что касается металла внутренней поверхности сварного узла трубы, то здесь происходит нагружение путем приращения деформации растяжения на стадии нагрева металла (при осевой деформации) и охлаждения (при кольцевой деформации). Температурно-деформационный цикл сварки может быть аппроксимирован неизотермической циклической деформацией сдвига. Суммированные приращения деформации растяжения являются критерием повреждения металла на внутренней поверхности под воздействием циклического нагружения. Моделирование процесса повышения механических напряжений показывает, что этот метод вызывает образование сжимающих напряжений вблизи внутренней поверхности трубы и может рассматриваться как умеренная обработка после сварки. Что касается сварных узлов, имеющих трещины после длительной эксплуатации, то требуется проведение дальнейших исследований ввиду наличия пластического деформирования вблизи вершины трещины и возможности предотвращения растягивающих напряжений.

**SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE IN STUDY OF SUSCEPTIBILITY OF WELDED JOINTS OF STABILIZED STAINLESS STEEL PIPELINES TO CRACKING.** V.V. Aladinsky, V.O. Makhanov, V.L. Melnikov (Russian State Research Center "NPO TsNIITMASH", Moscow, Russia). Intercrystalline stress corrosion cracking (ICSCC) of weldments made of the stabilized stainless steel is a relatively new phenomenon, revealed on pipelines of the nuclear power stations. This type of cracking was first revealed in Germany, then in Russia and on the pipelines of the third unit of the Chernobyl nuclear power station. These pipelines were made from the stabilized titanium steel 18Cr10Ni.

It is shown that, except the water chemistry, the welding also influences the ICSCC processes. The results of simulation, using the method of finite elements, are discussed. The simulation was aimed at the determination of characteristic features of stress-strain state, caused by welding, which determines the susceptibility of the weldment metal to ICSCC.

The presented results concern the welded joints of the pipeline in a closed cycle, whose outside diameter is 325 mm and a wall rated thickness is 16 mm. Welded circumferential joints with U- and T-shaped grooving were investigated. U-shaped groove at 20° angle was used at the nuclear reactors RBMK in the former USSR. T-shaped groove is an example of the narrow-gap welding technology, which reduces the weld metal volume. Variants of layer deposition with an additional transverse arc oscillation (U-shaped and T-shaped grooves) and with a deposition of beads (U-shaped groove) were simulated.

Simulation could not establish a noticeable decrease in residual tensile stresses at the inner pipe surface using variants with a small volume of the deposited metal.

Many researchers noted the negative effect of a plastic deformation on the corrosion resistance of the austenitic steels. During welding, the parent metal adjacent to the fusion line, undergoes plastic deformation, i.e. the non-isothermal low-cycle fatigue takes place. As to the metal of the inner surface of the pipe welded joints, then, here, the loading occurs by increment of the tensile strain at the stage of metal heating (at axial strain) and cooling (at circumferential strain). Temperature-deformational cycle of welding can be approximated by a non-isothermal cyclic shear strain. The summed increments of tensile strain are a criterion of metal damage on the inner surface under the action of a cyclic loading.

Simulation of process of improving mechanical stresses shows that this method causes the formation of compressive stresses near the inner surface of the pipe and can be considered as a normal postweld treatment. As to the weldments, having crack after a long-term service, then the further study is required due to a presence of a plastic strain near the crack tip and for prevention of tensile stresses.

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПО СИГНАЛАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.**

**А. М. Апасов** (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ). Разработаны и апробированы метод и устройство для определения координат дефектов в сварных соединениях по сигналам акустической эмиссии (АЭ), возникающих в процессе автоматической аргоно-дуговой сварки неплавящимся электродом кольцевых швов. Новое устройство, в отличие от созданных ранее, позволяет использовать только один пьезопреобразователь, произвольно ориентированный относительно сварного шва, причем прием сигналов АЭ осуществляется синхронно с поворотом сварочной головки и последующей их регистрацией на диаграмме. Определение координат дефектов (угол поворота) производится по лимбу, жестко закрепленному на цилиндрических изделиях, нулевая отметка которого совмещена с точкой начала сварки. Угол поворота выбирается с учетом диаграммы сигналов АЭ и диаграммы угла поворота сварочной головки. Отмечена высокая достоверность определения координат дефектов при контроле процесса сварки цилиндрических изделий.

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.**

**А. М. Апасов** (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ). Разработано и апробировано устройство для приема сигналов акустической эмиссии (АЭ), в котором механизм крепления датчика АЭ к поверхности контролируемого изделия выполнен в виде вакуумных присосок, шарнирно соединенных между собой коромыслом, воздействующим через регулятор усилия прижима на датчик. Вакуумные присоски выполнены в виде сильфонов, полости которых подсоединены к вакуумной магистрали. Регулятор усилия прижима представляет собой упругий элемент с прикрепленными к нему тензорезисторами со стороны коромысла, а с другой стороны, — через регулирующий стержень, взаимодействующий с датчиком АЭ. Тензорезисторы включены в электронную схему управления вакуумного вентиля с электромагнитным приводом, установленным в вакуумную магистраль.

Обеспечение заданных усилий прижима датчика АЭ к поверхности контролируемого изделия в широком интервале значений существенно расширяет функциональные возможности разработанного устройства, позволяющего производить испытания изделий из сплавов черной и цветной группы, а также неметаллов. За счет введения автоматического поддержания заданного усилия прижима датчика АЭ к изделию в течение всего испытания, а также сведения к минимуму искажения формы тонкой составляющей структуры и спектральной плотности первичного сигнала АЭ на границе изделие-датчик значительно повышена достоверность результатов контроля по сравнению с существующими аналогичными устройствами для приема сигналов АЭ.

**РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ПЯТНИКОВОГО УЗЛА ВАГОНА, ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПЛАВКОЙ.**

**Н. Н. Воронин, Н. Н. Воронин** (Гос. ун-т путей сообщения, г. Москва, РФ), **В. Г. Павлов, Д. Г. Эфрос** (Ин-т машиноведения РАН, г. Москва, РФ). Износ деталей в большой степени зависит от материалов, из которых изготовлены узлы пары трения.

**DEVICE FOR DETERMINATION OF COORDINATES OF DEFECTS IN WELDED JOINTS BY THE ACOUSTIC EMISSION SIGNALS.**

**A.M. Apasov** (Branch of Tomsk Polytechnical University, Yurga, Russia). Method and device for determination of coordinates of defects in welded joints by the acoustic emission (AE) signals, occurring during the process of the automatic argon-arc non-consumable electrode welding of circumferential welds have been developed and tested. The new device, unlike those designed earlier, makes it possible to use only one piezo-transducer, arbitrarily oriented relative to the weld. The AE signals are received synchronously with a rotation of the weld head and their subsequent recording in the diagram. The determination of coordinates of defects (angle of rotation) is made according to a limb, rigidly fixed on the cylindrical workpieces. Its zero mark is coincided with a point of the welding beginning. The angle of rotation is selected taking into account the diagram of AE signals and the diagram of an angle of the welding head rotation. A high truth of determination of coordinates of defects during the control of the process of welding cylindrical workpieces is outlined.

**DEVICE FOR RECEIVING THE ACOUSTIC EMISSION SIGNALS.**

**A.M. Apasov** (Branch of Tomsk Polytechnical University, Yurga, Russia). Device for receiving the signals of the acoustic emission has been designed and tested. In this device the mechanism of AE transducer fastening to the surface of the workpiece being examined is made in the form of vacuum suction cups, hinge-connected between themselves with a rocker acting on the transducer via a regulator of a pressing force. The vacuum suction cups are made in the form of bellows, whose cavities are connected to a vacuum line. The regulator of the pressing force is an elastic element with connected tensoresistors from the side of a rocker, and the other side is interacted with the AE transducer via a regulating rod. The tensoresistors are connected to the electron control circuit of a vacuum valve with an electromagnetic drive mounted into the vacuum line.

The ensuring of preset forces of the AE transducer pressing against the workpiece surface examined within the wide interval of values widens significantly the functional capabilities of the developed device which makes it possible to perform tests of the products made from ferrous, non-ferrous alloys, as well as from non-metals.

At the expense of using automatic maintenance of the preset force of the AE transducer pressing against the workpiece during the whole test, and also by reducing to minimum the distortion of shape of a fine constituent of the structure and a spectral density of the primary AE signal at the workpiece-transducer boundary, the truth of the control results is improved significantly, as compared with that obtained by using the existing similar devices for receiving AE signals.

**CALCULATED DETERMINATION OF SERVICE LIFE OF A RAILWAY CAR PIVOT JUNCTION REPAIRED BY SURFACING.**

**N.N. Voronin, N.N. Voronin** (State University of Rail Roads, Moscow, Russia), **V.G. Pavlov, D.G. Efros** (Institute of Engineering Sciences of RAS, Moscow, Russia). The wear of parts depends greatly on materials from which the pairs of friction are manufac-

Для серийного пятникового узла используют литье из стали марки 15Л, а для подпятника — сталь марки 20Л. Из опыта эксплуатации следует, что износостойкость этой пары трибосопряжения невысока. Современные технологии восстановления изношенных поверхностей пятникового узла предусматривают их наплавку. Установлено, что невысокая износостойкость пятникового узла может быть повышена в результате оптимального подбора материалов, изменения геометрии и т. п., возможных благодаря использованию расчетных методов. При разработке расчетного метода определения износов в пятниковом узле произведена его схематизация и создана расчетная схема, а для метода расчета изнашивания трибосопряжения пятникового узла была использована теория изнашивания материалов, основанная на теоретических и экспериментальных исследованиях, которая позволяет подбирать оптимальный триботехнический материал, прогнозировать износ трущихся сопряжений и ресурс трибосопряжения по критерию предельно допустимого износа.

При разработке расчетной модели трибосопряжения пятникового узла на износ полагали, что в случае наложения одной детали на другую и прижатии их силой  $P$  формируется пятно контакта площадью  $S_a$ , на котором в результате действия контактного давления  $p_a$  и проскальзывания при сдвиге одной детали относительно другой со скоростью  $V$  идет процесс изнашивания.

Форма и размеры площадки контакта, вид эпюры и значение контактных давлений зависят от прочностных свойств материалов трибосопряжения, геометрии поверхностей в области контакта сопрягаемых деталей. Скорость проскальзывания зависит от геометрии трущихся поверхностей, их взаимного расположения и угловой скорости  $\omega$  движения детали относительно друг друга. Контактное давление и скорость проскальзывания изменяются по площадке контакта и поэтому зависят от координат рассматриваемой на поверхности контакта точки  $M$ . Поскольку сила  $P$  и скорость движения  $\omega$  деталей сопряжения могут изменяться во времени  $t$ , то переменными во времени будут и параметры  $p(t, M)$ ,  $S(t)$ ,  $V(t, M)$ .

Применительно к пятниковому узлу было принято интенсивность изнашивания деталей трибосопряжения определять зависимостью, устанавливающей связь между линейным износом материала и длиной пути трения, на котором этот износ происходит. В процессе эксплуатации плоские контактные поверхности пятника и подпятника вращаются относительно друг друга. При этом путь трения  $dL$  каждой точки поверхности зависит от ее удаления  $r$  от оси вращения и от угла поворота  $\varphi_c$  пятника относительно подпятника. Многократные экспериментальные исследования позволили связать интенсивность изнашивания материала детали в трибосопряжении с контактным номинальным давлением степенной зависимостью в виде

$$I_j(t, M) = \left[ \frac{p(t, M)}{i_{0j}} \right]^{m_j},$$

где  $i_0$  и  $m$  — параметры износостойкости изнашиваемого материала (параметр  $i_0$  получил название модуля износостойкости).

Для серийного пятникового узла используют литье из стали марки 15Л, а для подпятника — сталь марки 20Л. Из опыта эксплуатации следует, что износостойкость этой пары трибосопряжения невысока. Современные технологии восстановления изношенных поверхностей пятникового узла предусматривают их наплавку. Установлено, что невысокая износостойкость пятникового узла может быть повышена в результате оптимального подбора материалов, изменения геометрии и т. п., возможных благодаря использованию расчетных методов. При разработке расчетного метода определения износов в пятниковом узле произведена его схематизация и создана расчетная схема, а для метода расчета изнашивания трибосопряжения пятникового узла была использована теория изнашивания материалов, основанная на теоретических и экспериментальных исследованиях, которая позволяет подбирать оптимальный триботехнический материал, прогнозировать износ трущихся сопряжений и ресурс трибосопряжения по критерию предельно допустимого износа.

При разработке расчетной модели трибосопряжения пятникового узла на износ полагали, что в случае наложения одной детали на другую и прижатии их силой  $P$  формируется пятно контакта площадью  $S_a$ , на котором в результате действия контактного давления  $p_a$  и проскальзывания при сдвиге одной детали относительно другой со скоростью  $V$  идет процесс изнашивания.

Форма и размеры площадки контакта, вид эпюры и значение контактных давлений зависят от прочностных свойств материалов трибосопряжения, геометрии поверхностей в области контакта сопрягаемых деталей. Скорость проскальзывания зависит от геометрии трущихся поверхностей, их взаимного расположения и угловой скорости  $\omega$  движения детали относительно друг друга. Контактное давление и скорость проскальзывания изменяются по площадке контакта и поэтому зависят от координат рассматриваемой на поверхности контакта точки  $M$ . Поскольку сила  $P$  и скорость движения  $\omega$  деталей сопряжения могут изменяться во времени  $t$ , то переменными во времени будут и параметры  $p(t, M)$ ,  $S(t)$ ,  $V(t, M)$ .

Применительно к пятниковому узлу было принято интенсивность изнашивания деталей трибосопряжения определять зависимостью, устанавливающей связь между линейным износом материала и длиной пути трения, на котором этот износ происходит. В процессе эксплуатации плоские контактные поверхности пятника и подпятника вращаются относительно друг друга. При этом путь трения  $dL$  каждой точки поверхности зависит от ее удаления  $r$  от оси вращения и от угла поворота  $\varphi_c$  пятника относительно подпятника. Многократные экспериментальные исследования позволили связать интенсивность изнашивания материала детали в трибосопряжении с контактным номинальным давлением степенной зависимостью в виде

$$I_j(t, M) = \left[ \frac{p(t, M)}{i_{0j}} \right]^{m_j},$$

где  $i_0$  и  $m$  — параметры износостойкости изнашиваемого материала (параметр  $i_0$  получил название модуля износостойкости).

Оба эти параметра зависят от микрогеометрии контактирующих поверхностей, прочности, усталости и также frictional characteristics of interacting materials. As the physico-mechanical properties are the temperature-sensitive

Оба эти параметра зависят от микрогеометрии контактирующих поверхностей, прочностных, усталостных, а также фрикционных характеристик взаимодействующих материалов. Поскольку физико-механические свойства являются температурно-чувствительными характеристиками материала, то и параметры износостойкости ( $i_0$ ,  $m$ ) тоже колеблются с изменением температуры трибосопряжения. Таким образом, материаловедческий аспект износостойкости может быть учтен в интенсивности изнашивания благодаря параметрам износостойкости материалов трибосопряжения, а аспекты конструкционной износостойкости — через контактное давление, скорость проскальзывания и геометрию деталей сопряжения.

Для ряда материалов, в том числе наплавляемых на изношенные поверхности пятникового узла, были проведены численные исследования по разработанной программе, определяющей износ в пятниковом узле и его ресурс в зависимости от различных факторов. Показано, что поверхности пятникового узла, наплавленные износостойким материалом, отличаются большим ресурсом, по сравнению с серийными.

#### УНИВЕРСАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

А. А. Гейзер (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь, Украина). Одним из методов неразрушающего контроля и диагностики является электромагнитный. На его основе нами разработано универсальное электромагнитное диагностическое устройство УЭДУ-1 для контроля качества и диагностики машиностроительных изделий широкого класса, в том числе сварных конструкций. Конструктивно УЭДУ-1 состоит из блоков датчиков, коммутации, измерения и управления, регистрации, интерфейсного блока и вычислительной машины.

Блок датчиков состоит из матриц индуктивных элементов и генератора магнитного поля. Отдельные катушки матриц индуктивных элементов посредством коммутатора каналов подключаются к блоку измерения и управления. Управление генератором магнитного поля осуществляется блоком измерения и управления.

Блок коммутации состоит из коммутатора каналов, усилителя сигналов, амплитудного детектора. Коммутатор каналов управляется от блока измерения и управления, а сигналы от амплитудного детектора идут к блоку измерения и управления.

Блок измерения и управления состоит из субблоков, основное назначение которых заключается в следующем. Субблоки интегратора, управления интегратором, управления системой № 1 и десятичного счетчика составляют интегрирующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП), служащий для преобразования измеряемых электродвижущих сил датчиков в цифровую форму. Субблок индикации предназначен для отображения измеряемой информации на индикаторе, которая может быть введена в вычислительную машину через блок интерфейса либо записана на бумажную ленту при помощи цифрового печатающего устройства ШЧ 68000К.

Субблок управления системой № 2 предназначен для управления коммутатором каналов блока коммутации. Измеряемый канал индуцируется суббло-

characteristics of the material, then the parameters of wear resistance ( $i_0$ ,  $m$ ) are also varied with a change in the temperature of a frictional conjugation. Thus, the materials science aspect of the wear resistance can be taking into account in the wear intensity due to parameters of wear resistance of materials of frictional conjugation and aspects of a structural wear resistance using a contact pressure, rate of slipping and geometry of conjugating parts.

For some materials including those deposited on the worn-out surfaces of the pivot junction the numerical investigations were carried out according to the developed program which determined the wear in the pivot junction and its service life depending on different factors. It is shown that the surfaces of the pivot junction deposited with the wear-resistant material are characterized by a higher service life as compared with those produced serially.

#### VERSATILE DEVICE FOR ELECTROMAGNETIC CONTROL OF WELDED STRUCTURES. A.A. Geizer (Priazovsky State Technical University, Mariupol, Ukraine).

The electromagnetic control is one of the methods of nondestructive testing (NDT) and diagnostics. On its basis, we have developed a versatile electromagnetic diagnostic device UEDU-1 for the quality control and diagnostics of a wide class of the machine-building products, including welded structures. As to the design, the UEDU-1 device consists of a block of transducers, commutation, measurement and control, a recording unit, an interface and computer.

The block of transducers consists of matrices of inductive elements and a generator of a magnetic field. Separate coils of matrices of inductive elements are connected to the block of measurement and control via commutator of channels. The magnetic field generator is controlled by a block of measurement and control.

The commutation block consists of a channels commutator, an amplifier of signals and an amplitude detector. The channels commutator is controlled from a block of measurement and control, and the signals from the amplitude detector are supplied to a block of measurement and control.

The block of measurement and control consists of a subblock, whose main purpose is as follows. Subblocks of an integrator, control of the integrator and system No.1, and a decimal counter compose an integrating analog-to-digital converter, which serves for converting the measured electromotive forces of the transducers into a digital form. A subblock of indication serves for display of the measured information on the indicator, which can be set into the computer via an interface block or written on a paper tape with the help of a digital-printing device ShCh 68000K.

A subblock of control of the system No.2 is designed for the control of a commutator of channels of the commutation block. The channel being measured is induced by a subblock of indication. The subblock for a generator control serves for generation of controlling pulses of a magnetic field generator. For the same purpose a subblock of a source of synchronizing pulses is used.

ком индикации. Субблок управления генератором служит для выработки управляющих импульсов генератора магнитного поля. Для этой же цели применяется субблок источника синхронизирующих импульсов.

Использование интегрирующего АЦП позволяет значительно повысить быстродействие УЭДУ-1, обеспечивая высокую точность измерений. В настоящее время при помощи упомянутой аппаратуры можно выполнять до 20 измерений в секунду с предельной погрешностью не более 0,5 %.

Блок измерения и управления построен на основе выпускаемой промышленностью измерительной тензометрической системы СИИТ-3. С учетом решаемой задачи в эту систему внесены необходимые изменения. Блок коммутации выполнен на основе герконовых реле типа РЭС-42. В этом же блоке размещены усилитель измеряемых сигналов и амплитудный детектор.

Блок датчиков выполнен в виде катушек Гельмгольца, между которыми размещены матрицы из индуктивных элементов, а катушки матрицы — печатным способом, чтобы все поле было занято их витками. Такая конструкция должна обеспечивать высокую чувствительность устройства к изменениям линейных размеров контролируемой детали, т. е. точность определения линейных размеров детали порядка десятков микрон.

Алгоритм работы УЭДУ-1 может быть следующим. Вначале, в случае отсутствия в рабочем объеме изделий, при выбранных режимах работы генератора магнитного поля снимаются показания со всех индуктивных датчиков в режимах внешнего поля и полей от отдельных индуктивных элементов. Эти показания представляют собой своеобразный «нуль» устройства и вносятся в вычислительную машину. Затем в рабочий объем блока датчиков помещаются последовательно эталонное изделие, аналог эталонной детали, снимаются аналогичные показания с датчиков при тех же самых режимах работы генератора магнитного поля. Все они вносятся в вычислительную машину, в которой формируется «машинный образ» эталонной детали и аналога. Путем сравнения «машинных образов» делается заключение о соответствии аналога эталонной детали.

Описанный алгоритм работы УЭДУ-1 может быть применен для системы диагностики и определения ресурса работы изделия.

**ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ.** С. В. Денбновецкий, В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, А. В. Лещинин, С. Р. Михайлов (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Метод промышленного рентгенотелевизионного контроля качества сварных соединений различных изделий литья и материалов основан на преобразовании рентгеновского изображения в световое на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения осуществляется в процессе контроля.

Основные достоинства этого метода, по сравнению с радиографией, — высокая производительность, экспрессность и низкая стоимость. Его применение эффективно в том случае, если производится просвещение большого количества однотипных изде-

The application of the analog-to-digital converter can increase significantly the quick-response of the UEDU-1 device, thus providing high-precision measurements. At present, the above-mentioned equipment can perform up to 20 measurements per second with a limiting error of not more than 0,5%.

The block of measurement and control is designed on the basis of the industrially-produced measuring tensometric system SIIT-3. Taking into account the problems to be solved the necessary changes are made in this system. The block of commutation is made on the basis of a sealed-contact reed relay of RES-42 type. An amplifier of signals and an amplitude detector are also located in this block.

The block of transducers is made in the form of Helmholtz coils, where matrices of inductive elements are located between them. The matrix coils are made by a printed method in such a way that to fill the whole area with their turns. This design should provide a high sensitivity of the device to changes in linear sizes of the part being examined, i.e. the accuracy of determination of linear sizes of the part of order of tens of microns.

The algorithm of UEDU operation can be as follows. First, when there are no workpieces in the working volume, the indications from all the inductive transducers in the conditions of external field and fields from separate inductive elements are taken at selected conditions of operation of the magnetic field generator. These indications are some "Zero" of the device and they are set into the computer. Then, a reference workpiece, an analog of the reference part are placed in succession to the working volume of the block of transducers. Similar indications are taken from the transducers at the same conditions of operation of the magnetic field generator. All of them are set into the computer, in which a "machine image" of the reference and analog parts is formed. Conclusion about the conformity of analog to the reference part is made from the comparison of "machine images".

The algorithm of the UEDU-1 device operation can be used for the system of diagnostics and assessment of service life of the product.

#### INCREASE IN SENSITIVITY OF X-RAY TV CONTROL.

S.V.Denbnovetsky, V.A.Troitsky, N.G.Beliy, A.V.Leshchishin, S.R.Mikhailov (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Method of industrial X-ray TV control of welded joints of different castings and materials is based on the transformation of X-ray image into a light image at an output screen of a radiation-optical converter. Analysis of the obtained image is performed during control.

The main advantages of this method, as compared with radiography, are the high efficiency, quick-response and low cost. Its application is effective in that case when it is necessary to inspect a large quantity of single-type items of gas cylinders, large-diameter pipes, tanks, etc. X-ray TV control envisages the use of X-ray units of a continuous action with a high dose of ionizing radiation. This is explained by the fact that the time of exposition

лий газовых баллонов, труб большого диаметра, цистерн и др.

Рентгенотелевизионный контроль предполагает использование рентгеновских аппаратов непрерывного действия с большой мощностью дозы ионизирующего излучения. Это связано с тем, что время экспозиции при рентгенотелевизионном контроле определяется длительностью одного телевизионного кадра.

Эффективным способом повышения чувствительности контроля и расширения диапазона контролируемых толщин изделий рентгенотелевизионной системы (РТВС) является перевод передающих электронно-лучевых приборов (ЭЛП) в режим регулируемой длительности накопления сигналов на мишени. В этом режиме при запертом на определенное время электронном луче ЭЛП происходит накопление входного изображения на мишени, а затем его считывание за один кадр и запоминание в устройстве памяти, из которого оно выводится для воспроизведения или обработки. В режиме регулируемой длительности накопления могут эффективно работать передающие ЭЛП как оптического, так и рентгеновского диапазонов, предназначенные для работы в режиме непрерывного считывания. В режиме регулируемой длительности накопления возможно многократное повышение чувствительности ЭЛП, а значит, и относительной чувствительности контроля РТВС. В такой РТВС длительность экспозиции уже не определяется временем одного телевизионного кадра, а может регулироваться от 1 до 1000 телевизионных кадров, т. е. от 0,04 до 40,0 с. Режим регулируемой длительности накопления используется в разработанной РТВС на основе рентгеновидикона с диаметром рабочего поля 90 мм. РТВС включает также видеопроцессор, позволяющий накапливать в цифровой памяти до 256 телевизионных кадров и обрабатывать изображения. РТВС может работать как с непрерывными, так и с импульсными рентгеновскими аппаратами.

**К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СВЫШЕ 200 000 Ч.** В. В. Дмитрик (Укр. инж.-пед. акад., г. Харьков, Украина). Вынужденная замена эксплуатирующихся крупногабаритных сварных соединений энергетического оборудования (например, корпусных деталей турбин), состоящих из теплоустойчивых сталей Cr-Mo-V перлитного класса, является весьма дорогостоящей операцией.

Ресурс эксплуатации сварных конструкций, составляющий 100 000 ч, экономически целесообразно увеличить до 200 000 ч и больше. Представляется актуальным изучение как исходной структуры сварных соединений, так и образующейся на различных стадиях их эксплуатации, а также механических свойств и особенностей разрушения.

Зарождение и развитие трещин в данных сварных соединениях систематизировано и происходит преимущественно на участке сплавления, перегрева и неполной фазовой перекристаллизации. Известны также и критерии, предъявляемые к исходной структуре сварных соединений. Например, исходную структуру стали марки 15X1M1Ф, используемую для изготовления оборудования энергоблоков сверх-

at X-ray TV control is determined by a duration of a single TV frame.

Transition of transmitting electron-beam units (EBU) into the condition of an adjustable duration of accumulation of signals in a target is an effective method of increasing the sensitivity of control and widening the range of controllable thicknesses of products of X-ray TV system. In this condition at an EBU electron beam, blocked for a certain time, an accumulation of an input image in target and then its reading per one frame and storage in the memory from which it is used for reproduction and processing occur. Within the condition of an adjustable duration of accumulation the transmitting EBU of both optical and X-ray ranges designed for operation in the condition of a continuous reading can effectively operate. In the condition of an adjustable duration of accumulation a multiple increase in EBU sensitivity and, thus, relative sensitivity of X-ray TV control system is possible. In this X-ray TV control system the duration of exposition is not determined by the time of only one TV frame, but can be adjusted from 1 to 1000 TV frames, i.e. from 0.04 to 40.0 s.

The condition of an adjustable duration of accumulation is used in the developed X-ray TV control system on the basis of X-ray vidicon with a diameter of a 90 mm working field. X-ray TV control system includes also a videoprocessor which can accumulate up to 256 TV frames in a digital memory and process images. X-ray TV control system can operate both with continuous- and pulsed-operated X-ray units.

**ABOUT THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF INCREASING THE SERVICE LIFE OF POWER EQUIPMENT WELDED JOINTS ABOVE 20000 HOURS.**

V.V.Dmitrik (Ukrainian Engineering-Pedagogical Academy, Kharkov, Ukraine). Emergency replacement of operating large-sized welded joints of the power equipment (for example casing parts of turbines) made of heat-resistant Cr-Mo steels of a pearlitic class is a rather costly operation.

It is rational to increase the 100000 h service life of welded structures up to 200000 h and more. For this purpose the study of both initial structure of welded joints and also those formed at different stages of their service and also mechanical properties and peculiarities of fracture is actual.

Initiation and propagation of cracks in the above-mentioned welded joints is systematized and occurs mainly at the region of fusion, overheating and partial phase recrystallization. The criteria are also known which are specified to the initial structure of the welded joints. For example, the initial structure of 15Kh1M1F grade steel used for manufacture of equipment of power units of supercritical parameters ( $P = 25.5$  MPa,  $T_0 = 545-565$  °C), containing up to 75 % ferrite (the rest is tempering bainite), refers to acceptable structure. That structure of

критических параметров ( $P = 25,5$  МПа,  $T_0 = 545...565$  °C), содержащую до 75 % феррита (остальное бейнит отпуска), относят к сдаточной. Оптимальной считают ту структуру металла шва и ЗТВ, которая отличается высокой степенью однородности. Установлено, что структуру, близкую к оптимальной, можно получить при ведении процесса сварки на режимах, основанных на результатах моделирования температурного режима процесса дуговой сварки.

Для определения температурного режима в области расплава ванны (кристаллизующегося металла шва и ЗТВ) разработали новый метод решения сопряженной тепловой задачи применительно к жидкой фазе в условиях закона Навье-Стокса и твердой фазе в условиях закона Фурье. При многопроходной дуговой сварке температурные поля соответственно накладываются, что обеспечивает локальный перегрев отдельных участков сварных соединений. На основе данных моделирования подобраны соответствующие значения погонной энергии процесса автоматической сварки в углекислом газе, позволяющие обеспечить необходимые условия для формирования структуры, близкой к оптимальной.

Установлено, что тепловложение в основной металл следует принимать минимальным, однако достаточным для проплавления кромок основного металла и не допускающим образование дефектов типа непроваров на границах между основным и наплавленным металлом.

Количественно определено тепловложение в основной металл, обеспечивающее отсутствие образования «мягких» ферритных и «твердых» мартенситных прослоек на участке сплавления металла шва и основного металла.

Установлена зависимость роста зерен на участке перегрева, а также размеров участка неполной перекристаллизации от тепловложения в основной металл. Расчетные значения температур позволили уменьшить балл зерна участка перегрева и размеры участка неполной перекристаллизации. В структуре данного участка можно также уменьшить количество свежих порций распада аустенита. Кроме того, структура  $Fe_d$  (металл шва) характеризуется меньшими фазовыми напряжениями, что способствует повышению ее стабильности, а также улучшению свойств.

**ДИАГНОСТИКА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ.** А. А. Дубов, В. И. Загребельный, А. В. Мозговой, А. Н. Рудаков (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Прогнозирование срока службы элементов конструкций является одной из актуальных проблем. Работоспособность стальных конструкций ограничена из-за накопления в них в процессе эксплуатации внутренних повреждений, обусловленных длительным воздействием механических и агрессивных сред. Под действием этих факторов изменяется как внутренняя структура материала, так и его реальные механические свойства. Существует много методов неразрушающего контроля, позволяющих обнаруживать внутренние повреждения деталей. Среди них — метод магнитной памяти (ММП), используемый для определения напряженно-деформированного состояния металла.

Метод ММП основан на анализе распределения магнитных полей рассеяния на поверхности изде-

weld metal and HAZ is considered optimum which is characterized by a high degree of homogeneity.

It is established that structure close to optimum can be produced during welding at the conditions based on the results of modelling the temperature conditions of the arc welding process.

To determine the temperature conditions in the region of weld pool (crystallizing weld metal and HAZ), a new method of solution of a mating heat problem relative to a liquid phase under the conditions of Navier-Stokes law and a solid phase under the conditions of the Fourier's law has been developed. During the multipass arc welding the temperature fields are respectively superimposed, thus providing a local overheating of separate areas of the welded joints. The appropriate values of a heat input of the  $CO_2$  automatic welding were selected on the basis of data of modelling that provides the necessary conditions for the formation of structure close to the optimum structure.

It was established that heat input to the parent metal should be accepted minimum, however, sufficient for melting the edges of the parent metal and preventing the formation of defects of a lack-of-penetration type at the boundaries between the parent and deposited metal.

The heat input to the parent metal that prevents the formation of "soft" ferritic and "hard" martensitic interlayers at the region of fusion of weld and parent metal was determined quantitatively.

The relation between the grain growth at the overheating region and also sizes of region of partial recrystallization and heat input to the parent metal is established. The estimated values of temperatures made it possible to decrease the size of grain in the overheating region and the sizes of a partial recrystallization region. An amount of fresh portions of austenite decomposition can also be decreased in the structure of the mentioned region. In addition, the structure of  $Fe_d$  (weld metal) is characterized by lower phase stresses that promotes increase in its stability and also in improvement of properties.

**DIAGNOSTICS OF STEEL STRUCTURES USING THE METHOD OF A MAGNETIC MEMORY.** A.A.Dubov, V.I.Zagrebelsky, A.V.Mozgovoy, A.N.Rudakov (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). The prediction of service life of the structure elements is one of the actual problems. The serviceability of steel structures is limited because of accumulation of inner damages during service, which are caused by a long-term action of mechanical and aggressive media. Under the action of these factors both the internal structure of the material and the real its mechanical properties are changed. There are many methods of non-destructive testing which can determine the inner damages of the parts. Among them, there exists a method of a magnetic memory, used for determination of a stress-strain state of the metal.

This method is based on the analysis of distribution of magnetic fields of dissipation on the surface of the object, being under the long-term service. These fields indicate the irreversible changes occurring in the metal

ля, находящегося в длительной эксплуатации. Эти поля свидетельствуют о необратимых изменениях, происходящих в структуре металла, характеризуют реакцию на действие главных рабочих нагрузок. Постоянные деформации под действием этих напряжений формируют структурные изменения и магнитные поля на поверхности ферромагнитной конструкции. ММП, кроме раннего обнаружения разрушения структуры металла, дает информацию о фактическом напряженном состоянии, выявляет зону концентрации напряжений.

Результаты экспериментальных обследований агрегатов энергетического оборудования с использованием ММП подтвердили целесообразность применения предлагаемых подходов при диагностике ответственных объектов.

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ТИПА, МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА ДЕФЕКТОВ.** А. Н. Козин, Е. А. Давыдов, В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Для снижения аварийности и повышения безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов в последние годы в СНГ широкое распространение получило проведение внутритрубной диагностики. Достигнуты успехи в профилометрии аномалий геометрии трубопровода, в определении потерь металла коррозионного происхождения при помощи ультразвуковых снарядов, толщиномеров и магнитных снарядов высокого разрешения.

Для определения типа и точных размеров обнаруженных магнитным снарядом аномалий сварного шва выполнен экспертный ультразвуковой контроль 18 сварных швов нефтепровода «Дружба» диаметром 1020...1220 мм и с толщиной стенки трубы 12 мм, в которых магнитный снаряд компании «British Gas» обнаружил 29 дефектов высотой от 40 до 90 % толщины стенки трубы.

Для определения типа и высоты дефектов использовали метод дифрагированных волн TOFD и метод синтезированной фокусирующей апертуры SuperSAFT. Согласно результатам ультразвукового контроля, все швы были разбиты на четыре группы по степени опасности и срочности ремонта.

В первую группу вошло четыре сварных шва (с плоскостными дефектами высотой более 5 мм), требующих срочного ремонта. Три сварных шва были отнесены ко второй группе и будут отремонтированы во вторую очередь. В третью группу зачислили четыре сварных шва с незначительными по высоте и длине дефектами, за которыми будет вестись наблюдение. В четвертую группу вошло семь ложно забракованных снарядом сварных швов, в которых дефекты при помощи ультразвукового контроля не были обнаружены. Ложные индикации магнитного снаряда были вызваны различными отклонениями в форме сварного шва (смещение кромок, разнотолщинность и овальность труб, утяжины и т. п.).

Сравнительный анализ результатов магнитного и ультразвукового контроля показал, что совпадение всех зафиксированных аномалий сварного шва составляет 75 %.

Металлографические исследования, проведенные на ряде сварных швов, с достаточно высокой веро-

структурой и характеризовать реакцию на действие основных рабочих нагрузок. Постоянные деформации под действием этих напряжений формируют структурные изменения и магнитные поля на поверхности ферромагнитной конструкции. ММП, кроме раннего обнаружения разрушения структуры металла, дает информацию о фактическом напряженном состоянии, выявляет зону концентрации напряжений.

Результаты экспериментального обследования энергооборудования с использованием ММП подтвердили целесообразность применения предлагаемых подходов при диагностике ответственных объектов.

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ТИПА, МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА ДЕФЕКТОВ.** А. Н. Козин, Е. А. Давыдов, В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Для снижения аварийности и повышения безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов в последние годы в СНГ широкое распространение получило проведение внутритрубной диагностики. Достигнуты успехи в профилометрии аномалий геометрии трубопровода, в определении потерь металла коррозионного происхождения при помощи ультразвуковых снарядов, толщиномеров и магнитных снарядов высокого разрешения.

Для определения типа и точных размеров обнаруженных магнитным снарядом аномалий сварного шва выполнен экспертный ультразвуковой контроль 18 сварных швов нефтепровода «Дружба» диаметром 1020...1220 мм и с толщиной стенки трубы 12 мм, в которых магнитный снаряд компании «British Gas» обнаружил 29 дефектов высотой от 40 до 90 % толщины стенки трубы.

Для определения типа и высоты дефектов использовали метод дифрагированных волн TOFD и метод синтезированной фокусирующей апертуры SuperSAFT. Согласно результатам ультразвукового контроля, все швы были разбиты на четыре группы по степени опасности и срочности ремонта.

В первую группу вошло четыре сварных шва (с плоскостными дефектами высотой более 5 мм), требующих срочного ремонта. Три сварных шва были отнесены ко второй группе и будут отремонтированы во вторую очередь. В третью группу зачислили четыре сварных шва с незначительными по высоте и длине дефектами, за которыми будет вестись наблюдение. В четвертую группу вошло семь ложно забракованных снарядом сварных швов, в которых дефекты при помощи ультразвукового контроля не были обнаружены. Ложные индикации магнитного снаряда были вызваны различными отклонениями в форме сварного шва (смещение кромок, разнотолщинность и овальность труб, утяжины и т. п.).

Сравнительный анализ результатов магнитного и ультразвукового контроля показал, что совпадение всех зафиксированных аномалий сварного шва составляет 75 %.

Металлографические исследования, проведенные на ряде сварных швов, с достаточно высокой веро-

структурой и характеризовать реакцию на действие основных рабочих нагрузок. Постоянные деформации под действием этих напряжений формируют структурные изменения и магнитные поля на поверхности ферромагнитной конструкции. ММП, кроме раннего обнаружения разрушения структуры металла, дает информацию о фактическом напряженном состоянии, выявляет зону концентрации напряжений.

яністю підтвердили результати ультразвукового контролю, причем погрешність определения высоты дефектов не превышала  $\pm 1$  мм.

Таким образом, показана возможность весьма точного измерения типа и высоты дефектов в сварных швах магистральных трубопроводов после магнитного снаряда, что позволяет оценивать остаточную прочность и принимать решение о необходимости ремонта.

#### УЛЬТРАЗВУКОВА КОМП'ЮТЕРНА ТОМОГРАФІЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ.

*В. Кошовий, З. Назарчук, Є. Кривін, І. Романишин, А. Гудко, В. Курій (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, м. Львів, Україна).* Доповідь присвячено новим технологіям неруйнівного контролю (НК) зварних металевих конструкцій, створеним на основі принципів ультразвукової комп'ютерної томографії (УЗКТ). Вказані технології відкривають нові можливості підвищення рівня технічної діагностики (ТД), які полягають не тільки у виявленні дефектів, але й у визначенні неоднорідного просторового розподілу (ПР) фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалу по об'єму виробу, що в традиційному НК використовували обмежено. Серед об'єктів контролю з неоднорідним ПР ФМХ найбільш поширені листові вироби із зварними з'єднаннями.

Представлено нові технології НК зварних з'єднань, які базуються на принципах УЗКТ. Вони дозволяють в реальному часі отримувати ПР ФМХ матеріалу, включаючи скалярні і тензорні характеристики. Теоретичні і експериментальні результати отримано при розробці ультразвукового томографа (УЗТ) UST-2000, призначеного для НК листових виробів із зварними з'єднаннями при односторонньому доступі.

Дослідження показали, що для забезпечення високої продуктивності НК та універсальності УЗТ щодо форми виробів необхідно збір даних проводити за допомогою променевих проекцій, а відновлення — шляхом побудови сумарного зображення (СЗ) в процесі збору даних, яке не є критичним до повноти збору даних, точності вимірювання проекцій і слугить як пошукове для виявлення аномальних областей шляхом фільтрації СЗ.

Розроблені технології визначення ПР ФМХ матеріалу базуються на зондуванні виробу поздовжніми, поперечними та поверхневими хвилями; вимірюванні проекцій (часів поширення та амплітудних параметрів ультразвукового сигналу); реконструкції томо- чи ортографічних зображень ПР акустичних характеристик (швидкостей поширення та згасання різних типів ультразвукових хвиль) та побудові на основі цього ПР ФМХ матеріалу (пружних, міцнісних, структурних, технологічних та ін.).

Для НК листового виробу при односторонньому доступі запропоновано дзеркально-тіньовий метод (ДТМ) збору даних, якому властивий обмежений ракурс.

На основі проекційної теореми показано, що в результаті збору проекцій ДТМ отримуємо інформацію про спектральний склад пошукової функції, окрім тих складових, які входять в конус з вершиною на початку координат та кутом при вершині, який визначається ракурсом збору даних. Найбільше інформації про ПР ФМХ міститься в даних при максимальному ракурсі вводу зондувального сигналу, що дозво-

ляє the magnetic pig is shown, that makes it possible to evaluate the residual strength and to take decision about need in repair.

#### ULTRASONIC COMPUTER TOMOGRAPHY OF WELDED STRUCTURES.

*V. Koshevoy, Z. Nazarchuk, E. Krivin, I. Romanishin, A. Gudko, V. Kuriy (G. V. Karpenko Physico-mechanical Institute, Lviv, Ukraine).* Paper is devoted to the new technologies of NDT of welded metal structures using principles of an ultrasonic computer tomography (USCT). The mentioned technologies open up new feasibility in increasing the level of a technical diagnostics (TD) which do not only reveal defects, but also define the heterogeneous spatial distribution (SD) of physico-mechanical characteristics (PhMCh) of material in the product volume which is limited in using traditional NDT. Among the objects of testing with heterogeneous SD of PhMCh, the sheet products with welded joints are most typical.

New technologies of NDT of welded joints are presented which are based on principles of USCT. They provide SD of PhMCh of material in a real time including scalar and tensor characteristics. Theoretical and experimental results were obtained in the development of the ultrasonic tomograph UST-2000 designed for NDT of sheet products with welded joints at a single-sided access.

The investigations showed that to provide high efficiency of NDT and versatility of UST as to the shape of products the data should be accumulated using beam projections, while reproduction of data - by a construction of a total image (TI) during the process of data acquisition which is not critical for a complete data acquisition, accuracy of measuring projections and serves as searching means for revealing the anomalous areas by filtration TI.

The developed technologies of determination SD of PhMCh of material is based on probing of the product by longitudinal, transverse and surface waves; measuring of projections (times of extension and amplitude parameters of ultrasonic signal); reconstruction of tomographic and orthographic images of SD of acoustic characteristics (rates of extension and damping of different types of ultrasonic waves) and construction of SD of PhMCh of material on this basis (elastic, strength, structural, technological, etc.).

A mirror-shadow method (MSM) of data acquisition which is characterized by a limited foreshortening has been suggested for NDT of sheet products at a single-sided access.

On the basis of a projection theorems it is shown that as a result of acquisition of projections by MSM the information is obtained about the spectral composition of the searching function except those components which are included into a cone with an apex at the beginning of coordinates and an angle at the apex which is determined by a foreshortening of data acquisition. The most part of information about SD of PhMCh is contained in data at a maximum foreshortening of a probing signal input that makes it possible to be limited with one angle of input at a practical realization.

ляе обмежитись одним кутом вводу при практичній реалізації.

На основі теоретичних досліджень розроблено ефективний алгоритм реконструкції пошукового ПР ФМХ матеріалу в об'ємі листового виробу при одноракурсному зборі даних «в конусі» на базі оберненого проектування і формування СЗ.

Можливості відновлення ПР ФМХ матеріалу в об'ємі виробу на базі розроблених методів підтверджено чисельним моделюванням та експериментами.

Розроблено модель УЗТ і UST-2000 для НК, який має визначати ПР акустичних характеристик і пов'язані з ними ФМХ матеріалу, такі як пружні (модулі пружності), міцнісні, технологічні (твердість), структурні (розмір зерна, ступінь міжкристалічної деградації). Представлено експериментально відновлені зображення, отримані на товстостінному листовому зразку.

#### НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ. Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, И. В. Киянец, Е. М. Олейник (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

В современных отраслях промышленности широкое применение находят композитные материалы. При использовании элементов конструкций, изготовленных из композитных материалов, важным является обеспечение их качества и работоспособности. В связи с этим разработка и совершенствование неразрушающих методов их диагностики по-прежнему остаются актуальными.

В последние годы интенсивно развиваются бесконтактные методы неразрушающего контроля качества на основе электронной ширографии.

Ширографическая методика неразрушающего контроля основана на сравнении двух спекл-картин исследуемой поверхности, записанных в исходном и нагруженном состоянии объекта. Полученные на мониторе компьютера интерференционные полосы несут информацию о распределении деформаций по поверхности контролируемого объекта. В отличие от голографической интерферометрии, новая методика электронной ширографии менее чувствительна к вибрациям и смещениям объекта как жесткого целого. Это позволяет использовать ее как в лабораторных условиях, так и на производстве.

Представлены результаты экспериментов по контролю качества композитных труб диаметром 100 мм с использованием электронной ширографии. Показаны перспективы применения разработанной методики для исследования конструкций, изготовленных из различных материалов.

#### АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН ПОЛОС ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ. Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, П. Д. Кротенко, Е. М. Олейник (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Для неразрушающего контроля качества элементов и узлов конструкций, изготовленных из металлических и композиционных материалов, широко используются методы голографической интерферометрии.

К числу положительных качеств голографических методов неразрушающего контроля относятся возможность простого визуального наблюдения в ре-

On the basis of theoretical studies an effective algorithm of reconstruction of a searching SD of PhMCh of material in the volume of a sheet product at a single foreshortening at acquisition of data "in cone" on the basis of reversible projection and formation of TI is developed. The feasibility of reproduction of SD of PhMCh of material in the product volume using the developed methods was confirmed by a numerical modelling and experiments.

UST model and UST-200 for NDT were developed which are designed for determination of SD of acoustic characteristics and associated PhMCh of material such as elastic (modulus of elasticity), strength, technological (hardness), structural (size of a grain, degree of an intercrystalline degradation). Experimental reproduction of images obtained on thick-walled sheet sample is presented.

#### NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF COMPOSITE PIPES USING THE METHOD OF ELECTRON SHEAROGRAPHY. L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, I.V.Kiyancets, E.M.Oleinik (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Composite materials find a wide application in advanced branches of industry. When structure elements made from the composite materials are used, it is important to ensure their quality and serviceability. In this connection, the development and improvement of non-destructive methods of their diagnostics remain actual.

During recent years the contactless methods of non-destructive quality control on the basis of the electron shearography are developed.

The shearographic method of the non-destructive examination is based on the comparison of two speckle patterns of the surface examined, recorded in initial and loaded states of the object. Interference fringe patterns, obtained on the computer monitor, contain information about the distribution of strains over the surface of the object examined. Unlike the holographic interferometry, the new method of the electron shearography is less sensitive to the vibrations and displacements of the object. This allows this method to be used both under the laboratory and industrial conditions.

The results of experiments on quality control of composite pipes of 100 mm diameter using the electron shearography are presented. Prospects of application of the method developed for examination of structures made from different materials are shown.

#### AUTOMATIC COMPUTER ANALYSIS OF HOLOGRAPHIC INTERFERENCE FRINGE PATTERNS IN NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF MATERIALS AND STRUCTURES. L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, V.V.Savitsky, P.D.Krotenko, E.M.Oleinik (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Methods of holographic interferometry are widely used for the non-destructive quality control of elements and members of structures made from metallic and composite materials. Among the advantages of the holographic methods of non-destructive testing it is possible to distinguish a simple visual inspection of the interference fringe patterns in a real time over the whole field, adaptability to examination of objects, having an intricate shape, and also an

альном масштабе времени картины интерференционных полос по всему полю, применимость к исследованию объектов, имеющих сложную форму, а также отсутствие специальных требований к обработке поверхности исследуемых объектов и др. Голографическая интерферометрия может эффективно применяться для неразрушающего контроля в случае, если наличие дефекта приводит к аномальной картине интерференционных полос при нагружении объекта. Качественный анализ картин позволяет определить наличие дефектов в контролируемом объекте.

Представлена новая методика автоматической обработки голографических интерференционных картин полос на основе использования преобразования Фурье. Предлагаемая методика позволяет установить без применения специальных приборов (таких как модулятор частоты) поле фаз по поверхности исследуемого объекта. Дальнейший компьютерный анализ данных дает возможность построить поверхность перемещений деформированного объекта, по которой можно судить о наличии дефектов.

Показаны примеры применения предлагаемой методики при контроле элементов сварных конструкций и перспективы использования автоматического анализа интерферограмм для неразрушающего контроля качества различных материалов и конструкций.

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ СБОРКИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.** Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Г. И. Ткачук, В. Г. Юрченко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. Н. Шишкин (Науч.-техн. центр, г. Желтые воды, Украина). Представлены результаты применения метода голографической интерферометрии для бесконтактного неразрушающего контроля качества сварных элементов дистанционирующих решеток. Для проведения контроля разработаны и созданы оптические схемы и устройства, при помощи которых зарегистрирована локальная концентрация перемещений в зонах дефектов под действием тепловых нагрузок при температурах 50...70 °С. Различия в концентрациях перемещений бездефектного и дефектного участков определяли по картине интерференционных полос. При этом для получения четкой картины интерференционных полос, характеризующих дефектность решетки, создавался специальный отражающий экран. Для регистрации голограмм использовали малогабаритную камеру мгновенной записи на основе аморфных молекулярных полупроводников, обеспечивающую возможность многократной записи и стирание изображений с реверсивностью не менее 1000 циклов.

В результате теоретических исследований и экспериментов отработана голографическая методика неразрушающего контроля дистанционирующих решеток, показана перспективность голографического метода контроля качества сварных дистанционирующих решеток.

absence of special requirements to the preparation of surface of objects to be examined, etc. The holographic interferometry can be used effectively for the non-destructive testing, if the presence of a defect leads to the anomalous interference fringe pattern under the object loading. The qualitative analysis of patterns makes it possible to determine the presence of defects in the object examined.

The new method of automatic processing the holographic interference fringe patterns is presented. The above method can establish the field of phases on the surface of the object examined without application of a special device, such as a frequency modulator. The next computer analysis of data gives a feasibility to construct a surface of displacements of the deformed object. The presence of defects can be judged from this surface.

The examples of application of this method in examination of elements of welded structures and prospects of using the automatic analysis of interferograms for the non-destructive quality control of different materials and structures are shown.

**NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF ASSEMBLY ELEMENTS OF A SPACING GRID USING THE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY.** L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, G.I.Tkachuk, V.G.Yurchenko (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine), V.N.Shishkin (Research-Engineering Center, Zhyolyte Vody, Ukraine). Results of using the method of the holographic interferometry for a contactless non-destructive control of welded elements of a spacing grid are presented. To perform the control, the optical schemes and devices have been developed which could record a local concentration of displacements in the zones of defects under the action of thermal loads at temperatures 50-70°C. Differences in concentrations of defect-free and defective regions were determined from the pattern of the interference fringes. In addition, a special reflecting screen was designed for obtaining a distinct pattern of the interference fringes which characterize the grid defectness. A small-sized camera of an instantaneous record, based on amorphous molecular semiconductors was used for the hologram recording. This camera provides a feasibility of a multiple recording and erasing of images with a reversivity of at least 1000 cycles.

The theoretical studies and experiments resulted in an updated holographic procedure of a non-destructive examination of the spacing grids. The prospects of using the holographic method for the quality control of welded spacing grids are shown.

# **КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ АУЗК СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ.**

**В. Л. Найда, В. А. Филиппенков, В. В. Гетьман** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), **В. М. Пышный** (Энергоатом контроль-сервис, г. Энергодар, Украина), **В. М. Тороп** (Науч.-техн. центр материаловед. сопровождения пр-ва и сертификации оборуд. АЭС, г. Киев, Украина). В процессе длительной эксплуатации трубопроводов в сварных швах возникают и развиваются локальные дефекты, среди которых доминирующими являются усталостные трещины и коррозионные повреждения. Дальнейшая работоспособность таких трубопроводов обеспечивается за счет ремонтно-восстановительных работ, квалифицированное проведение которых возможно лишь на основании результатов технического диагностирования. Показано, что для решения этой задачи требуется применение средств автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) как наиболее эффективного метода обнаружения особо опасных дефектов (трещин), характеризуемого высокой достоверностью результатов, а также компьютерных экспертных систем для принятия правильных решений, касающихся дальнейшей эксплуатации трубопровода или его ремонта.

Рассмотрены возможности современных средств АУЗК, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона, а также оригинальных конструкций ультразвуковых головок, применяемых в этих системах, показаны преимущества их использования. Электронная часть системы АУЗК выполнена на базе промышленного компьютера. В структуру аппаратной части заложен принцип дистанционного разделения компонентов системы АУЗК, что позволяет легко модифицировать систему под различные объекты контроля.

В ходе анализа и обработки сигналов производятся идентификация дефектов, вычисление их параметров и координат. Кроме того, автоматизация УЗК с применением современной компьютерной техники обеспечивает средствам контроля следующие новые возможности:

- программирование и запоминание всех параметров режима работы гарантирует воспроизводимость режима контроля при повторных испытаниях;
- фиксация в памяти параметров режима работы позволяет производить быструю и точную калибровку и настройку системы контроля даже при неблагоприятных условиях работы;
- проводимые без участия оператора сбор и обработка данных позволяют выдавать объективное заключение по результатам контроля;
- накопление результатов контроля в течение всего периода эксплуатации объекта дает возможность наблюдать развитие дефектов, что необходимо для определения фактического остаточного ресурса службы трубопроводов;
- значительное снижение времени контроля позволяет осуществлять более частый и полный контроль при выполнении планово-предупредительных ремонтов трубопроводов (например на АЭС);
- имеется возможность получать изображения дефектов и на их основе создавать каталоги эксплуатационных дефектов, характерных для данного трубопровода;

# **INTEGRATED APPROACH IN DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF PIPELINES AT AUTOMATED UST OF BUTT WELDS.**

**V.L.Naida, V.A.Filippenkov, V.V.Getman** (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine), **V.M.Pishnyi** (Energoatom control-service, Energodar, Ukraine), **V.M.Torop** (Research and Technology Center of materials science, production supervision and NPS equipment certification, Kyiv, Ukraine). Long-term service of pipelines leads to initiation and propagation of local defects, with the fatigue cracks and corrosion damages dominating among them. The further serviceability of these pipelines is provided due to repair - restoration works whose performance is possible only on the basis of results of a technical diagnostics. It is shown that to solve this problem, the means of an effective method of detection of hazardous defects (cracks) with a high validity of results, and also computer expert systems for taking the right solutions concerning the further service of pipeline or its repair, are required. The capabilities of advanced means of AUST developed at the Paton Institute and also unique designs of ultrasonic heads used in these systems are considered and the advantages of their application are shown. The electronic part of the AUST system is based on an industrial computer. The hardware structure is based on a principle of a remote separation of AUST system components, that can modify the system easily for different objects of control.

In the course of analysis and processing of signals the identification of defects, calculation of their parameters and coordinates is performed. In addition, the automation of UST using an advanced computerized equipment provides the following new opportunities for the means of control:

- programming and storing of all parameters of operation conditions guarantee the reproducibility of the control conditions at repeated tests;
- storing in memory of operation condition parameters provides a quick and precise calibration and setting of control system even at unfavourable operation conditions;
- acquisition and processing of data without involvement of operator permit issuing of objective report from the control results;
- accumulation of control results during the whole period of the object service gives a feasibility to observe the propagation of defects that is required for determination of a real residual service life of the pipelines;
- significant reduction in control time makes it possible to perform more frequent and complete control during fulfilment of scheduled-preventive repairs of pipelines (for examples at NPS);
- there is a feasibility to produce images of defects and to create on their basis the catalogues of service defects typical of the given pipeline;
- presence of interfaces for exchange of information with working stations of computer networks gives a feasibility to develop a structure in future that will make it possible to perform the exchange of information from the results of control between the subdivisions of nuclear power engineering of Ukraine or, for example authorities of oil-gas complex.

As the parameters which characterize the objects of diagnostics, defects, loading conditions and mechanical properties of materials can change in time, then strength

• наличие интерфейсов для обмена информацией с рабочими станциями вычислительных сетей дает возможность развития в перспективе структуры, позволяющей осуществлять обмен информацией по результатам контроля между подразделениями атомной энергетики Украины или, например, управлениями нефтегазового комплекса.

Поскольку параметры, характеризующие объекты диагностики, дефекты, условия нагружения и механические свойства материалов, могут изменяться во времени, то прочностное сопровождение эффективно при условии использования компьютерных систем искусственного интеллекта.

Описан созданный для этой цели программный комплекс «Прочность», состоящий из трех основных блоков:

- системы управления базами данных «Информационная модель объекта диагностики», предназначенной для формирования и ведения основных баз данных;

- «Расчетных модулей», состоящих из программно-методических комплексов. Главным требованием к расчетным модулям является достоверность и быстрое действие решения задач. Оценка прочности и расчет долговечности трубопровода с обнаруженными дефектами выполняются на основе известных подходов Хейвуда, Коффина-Менсона и Париса;

- «Технологических задач и рекомендаций», позволяющих обосновать принимаемые решения, а также выработать рекомендации по безопасной эксплуатации трубопроводов.

Объединение в одной аппаратуре на базе ЭВМ задач неразрушающего контроля и экспертной оценки прочности позволяет комплексно диагностировать техническое состояние трубопроводов.

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИЭС-ЭАКС ПО МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МАТЕРИАЛОВ. В. Л. Найда, В. А. Филиппенков, А. С. Ковбасенко, О. Ф. Лобанов, В. А. Чиженко, А. А. Мозжухин (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. М. Пышный (Энергоатом контроль-сервис, г. Энергодар, Украина).

Опыт, накопленный нашими организациями в процессе создания и внедрения на ЧАЭС первой в Украине многоканальной системы автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) сварных кольцевых швов трубопроводов первого контура охлаждения реактора РБМК-1000 на базе персонального компьютера (комплекса НК193), позволяет постоянно расширять сферы применимости вычислительной техники в неразрушающем контроле (НК) материалов и сварных соединений. Использование компьютерных станций типа 850СТ, а также создание дефектоскопической, питающей и управляющей составляющих автоматизированных систем на базе стандартных комплектующих позволило унифицировать электронную аппаратуру. Решение новых технологических и методологических задач при механизированной и автоматизированной дефектоскопии (МАД) сводится к разработке сканирующих устройств и к адаптации электронной аппаратуры. Именно таким образом на базе комплекса НК193 в короткие сроки была создана уникальная установка НК300 для АУЗК сварных швов и основного металла стояков верхнего тракта технологичес-

analysis is effective when the computer systems of an artificial intellect are used.

A program complex "Strength" consisting of three main units developed for this purpose, is described:

- "Information model of object of diagnostics" system of data base control designed for formation and updating the main data bases;

- "Calculation modules" consisting of program-methodological complexes. The main requirement to the calculation modules is a validity and quick-response of solutions of problems. Estimation of strength and calculation of service life of pipeline with defects revealed, are made using known approaches of Haywood, Coffin-Manson and Paris;

- "Technological tasks and recommendations" which allows substantiation of the taken solutions, as well as issuing recommendations on safety of pipeline service. The combination of NDT tasks and expert estimation of strength in a common computer-based equipment make it possible to diagnose integrally the technical condition of pipelines.

#### CHALLENGING DEVELOPMENTS OF THE PATON INSTITUTE AND EACS ON MECHANIZATION AND AUTOMATION OF NDT OF WELDED JOINTS AND MATERIALS. V.L.Naida, V.A.Filippenkov, A.S.Kovbassenko, O.F.Lobanov, V.A.Chizhenko, A.A.Mozzhukhin (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). V.M.Pyshnyi (Energoatom control-service, Energodar, Ukraine).

The experience gained by our organisations in the process of creation and implementation of Ukraine's first multichannel system of automated UST of welded circumferential welds of pipings of the first loop of cooling the RBMK-1000 reactor on the basis of a personal computer (NK-193 complex) at Chernobyl NPS makes it possible to widen continuously the spheres of adaptability of computer engineering in NDT of materials and welded joints. The use of computer stations of 850ST type and also the creation of defectoscopic, supplying and control constituents of automated systems on the base of standard components could unify the electronic equipment. The solution of new technological and methodological problems in mechanized and automated flaw detection (MAD) is reduced to the development of scanning devices and to the adaptation of the electronic equipment. On the base of complex NK193 proper a versatile unit NK300 for AUST of welds and parent metal of the upper passage posts of technological channels of RBMK-1000 reactor for Chernobyl NPS was manufactured during a short period of time. It can find a wide application in all reactors of the mentioned type. The same approach was selected in the develop-

ких каналов реактора РБМК-1000 для ЧАЭС, которая может найти широкое применение на всех реакторах данного типа. Такой же подход выбран при разработке мобильного комплекса НК310 для диагностики магистральных трубопроводов большого диаметра при ремонтных работах.

Решению проблемы минимизации и унификации механо-акустической части средств МАД посвящена разработка трех основных модификаций легковесных компактных сканеров для использования в системах АУЗК кольцевых сварных швов трубопроводов диаметром 420...1420 мм с толщиной стенки 8...75 мм (МАД100, МАД102 и МАД103) в общей сложности 180 исполнений. Сканер типа МАД100 основной модификации предназначен для двух- и восьмиканальных систем АУЗК труб диаметром 530...1420 мм. В состав сканера входят:

- блок механо-акустический (БМА);
- датчик поиска кольцевого шва и слежения за ним;
- гирлянды связей.

Масса накладных устройств в зависимости от типа-размера не превышает 6...24 кг, масса каретки с БМА — не более 15 кг. Сканер МАД102 (для систем АУЗК труб Ду 400...Ду 850 контуров охлаждения реакторов) отличается от МАД100 бесприводными облегченными накладными устройствами, двухприводной кареткой для орбитального и продольно-поперечного сканирования, а также большей акустической емкостью БМА. Сканер МАД103 представляет собой «симбиоз» из накладных устройств МАД100, каретки МАД102 и любого из БМА. В состав специализированных модификаций, примененных для газовой или плазменной резки, сварки, дефектоскопии другими методами, вместо БМА могут входить соответствующие инструменты. Большое внимание ИЭС-ЭАКС (Энергоатом контроль-сервис) уделяют проблемам механизации НК. Так, созданный совместный комплект малой механизации НК187.01.05.000 избавляет дефектоскопистов от трудоемкой операции по нанесению жировой контактной смазки и ее удалению при ручном ультразвуковом контроле сварных швов, а также повышает его надежность. В атомной энергетике одной из важнейших задач эксплуатации является снижение доз облучения персонала. Особую актуальность она приобретает в случае проведения массовой дефектоскопии однотипных элементов в ограниченном пространстве с высоким радиационным фоном, например при вихревом контроле (ВТК) теплообменных трубок и перемычек коллекторов парогенераторов. В настоящее время трубки контролируют с помощью дорогого импортного металлоемкого полустационарного оборудования, а перемычки — вручную дефектоскопами типа ВД-73НЦ, доводя дозы облучения операторов до предельно допустимых. Удачную попытку механизации ВТК перемычек предприняли рационализаторы ЮУАЭС, а на ее основе ЭАКС разработал механический манипулятор НК330, опытный образец которого успешно испытан на ЗАЭС. Тем не менее, осознание необходимости создания промышленного образца легкого разборного переносного устройства механизированного ВТК для оснащения в перспективе всех отечественных АЭС побудило ЭАКС в инициативном порядке взяться за новую разработку. В настоящее время эта разработка выполнена на уровне детализированного тех-

мент of a mobile complex NK310 for diagnostics of main large-diameter pipelines during repair works.

The development of three main modifications of light compact scanners for their use in systems of AUST of circumferential welds of 420–1420 mm diameter pipelines with 8–75 mm wall thickness, (MAD100, MAD102 and MAD103), 180 versions in total was devoted to the development of the problem of minimizing and unification of mechano-acoustic part of the MAD means. Scanner of MAD100 type of the main modifications is designed for two- and eight- channel system of AUST of 530–1420 mm diameter pipes. Scanner includes:

- mechano-acoustic unit (MAU);
- sensor of searching the circumferential weld and its tracking;
- connecting chains.

The mass of captive devices depending on type and size, does not exceed 6–24 kg, the mass of a carriage with MAU is not more than 15 kg. Scanner MAD102 (for system of AUST of Du400 — Du855 pipes of cooling loops of reactors) differs from MAD100 by drive-free light captive devices, two-drive carriage for orbital and longitudinal-transverse scanning and also by a high acoustic capacity of MAU. Scanner MAD103 represents a "symbiosis" of captive devices MAD 100, carriage MAD102 and any MAU. The composition of specialized modifications used for gas and plasma cutting, welding, flaw detection by other methods may include the proper tools instead of MAU. The Paton Institute and EAKS pay a large attention to the problems of NDT mechanization. Thus, a set of "small" mechanization NK-187.01.05.000, co-produced by the two organizations, eliminates the labour-consuming operations and use of contact grease and its removal in manual UST of welds and also increases its reliability.

One of the most important problems of service in the nuclear power engineering is a reduction of doses of personnel exposure to radiation. It is specially actual in large-scale flaw detection of one-type elements in a limited space with a high radiation background, as, for example, during eddy current control of heat-exchanger tubes and bridges of steam generator collectors. At present the tubes are inspected using an expensive imported metal-intensive semi-stationary equipment, while bridges are inspected manually using flaw detectors of VD-73NTs type, resulting in the radiation doses for operators close to the admissible levels. The successful attempts of mechanizing eddy current control of bridges were made by inventors of Yu.Ukr.NPS and EAKS who developed on this basis a mechanical manipulator NK330 which prototype was tested in ZNPS. Nevertheless, the creation of industrial model of dismountable portable device of a mechanized eddy current control is necessary to equip all domestic NPS in future and this task was taken by EAKS for realization. At present this development has been accomplished at the level of a detailed technical project MAD110 which gives an idea about design features and technical capabilities of these means of mechanization. The device manipulator consists of two easily abutted modules: an aligning device with a suspended unit of an eddy current transducer and an extension. The length of each module does not exceed 2.6 m, that guarantees their mobility in transportation to the inspection site. The project envisages a number of radically new solutions for alignment and fastening of manipulator, its abutting to modules, for

нического проекта МАД101, дающего достаточное представление о конструктивных особенностях и технических возможностях этого средства механизации. Манипулятор устройства укрупненно состоит из двух легко стыкуемых модулей: центратора с подвеской блока вихретокового преобразователя (ВТП) и надставки. Длина каждого модуля не превышает 2,6 м, что обеспечивает их мобильность при доставке к месту контроля. В проект заложен целый ряд принципиально новых решений по центрированию и фиксации манипулятора, по стыковке его модулей, по приводам и их расположению, по компенсации пространственной несоосности ВТП и развальцованных участков трубок и др. «Ноу-хау» является также возможность трансформирования манипулятора в аналогичное переносное устройство для ВТК трубок с 80%-й унификацией.

**КОМПЛЕКСНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ.** А. Я. Недосека, М. А. Яременко (Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, м.Київ, Україна). Зварні оболонкові конструкції відносяться до категорії особливо відповідальних, тому що їх руйнування завжди пов'язане із забрудненням довкілля і, як правило, з людськими жертвами та каліцтвами.

Підвищення кількості руйнувань із значними економічними, екологічними і соціальними наслідками, збільшення кількості конструкцій, що відпрацювали проектний термін, економічна неможливість їхньої заміни, різноманітність і складність процесів руйнування визначають (у зв'язку з неможливістю 100%-го контролю) необхідність комплексного підходу до обстеження зварних оболонкових конструкцій, насамперед магістральних газопроводів, що включає визначення місць можливого утворення дефектів, які розвиваються, напруженого стану, оцінку інтенсивності корозійних процесів, старіння металу та ін.

На основі результатів досліджень, а також обстеження ділянок газопроводів розроблено одну з моделей руйнування магістральних газопроводів. Визначено, що початковим етапом руйнування магістральних газопроводів є порушення та відшаровування ізоляції. Як правило, руйнування бітумної ізоляції починається після 20 років експлуатації. Більш інтенсивно воно відбувається на низинних ділянках рельєфу місцевості з високим рівнем ґрунтових вод в заплавах рік і починається із зони кільцевих та поздовжніх зварних швів. Наслідком порушення і відшаровування ізоляції є зрушення електродного потенціалу труби в позитивний бік. Рівень і характер розподілу електродного потенціалу труби є інформативним параметром діагностики, що визначає можливість підвищення швидкості електрохімічної корозії, а також протікання процесу локального катодного виділення водню. Кількісно швидкість загальної електрохімічної корозії визначається товщинометрією як зменшення товщини стінки труби, віднесені до проміжку часу між двома вимірами. Важливу інформацію для формування методик комплексної діагностики має також зміна з часом електродного потенціалу труби, що є непрямим ознакою старіння і відшаровування ізоляції.

Наступним етапом руйнування газопроводу стає підвищення швидкості корозії в локальних місцях порушення ізоляції на ділянках зрушення електродного потенціалу труби.

drives and their arrangement, for compensation of a spatial misalignment of eddy current transducer and expanded regions of tubes, etc. "Know-how" is also a feasibility of the manipulator transformation into a similar portable device for eddy current control of tubes with 80 % unification.

**INTEGRATED DIAGNOSTICS OF MAIN GAS PIPELINES.** A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Welded shell structures belong to the category of especially critical structures because their fracture is always associated with pollution of environment and, as a rule, with human life loss and disabling injury.

The increase in amount of fractures with significant economical, ecological and social results, increase in quantity of structures that passed their design period, the economical inability of their replacement, variety and complexity of processes of fracture, define (due to impossibility of 100% inspection) the need in an integrated approach to inspection of welded shell structures, first of all, main gas pipelines, that will include the feasibility of inspection of propagating defects, stressed state and the assessment of intensity of corrosion processes, metal ageing, etc.

Proceeding from results of examinations and also inspection of gas pipeline sites a model of fracture of main gas pipelines was designed. It is determined that the fracture of main pipelines is started by a damage and separation of insulation. As a rule, the fracture of a bitumen insulation begins after 20 years of service. It is more intensive in the lowland sections of the land relief with a high level of ground waters, flood plains and started from the zone of circumferential and longitudinal welds.

Damage and separation of insulation causes the shifting of the electrode potential pipe to the positive side. Level and nature of distribution of the electrode potential of the pipe is an informative parameter of diagnostics which defines the possibility of increasing the rate of electrochemical corrosion and also the proceeding of the process of a local cathode evolution of hydrogen. Quantitatively, the rate of general electrochemical corrosion is determined by thickness measurement as decrease in thickness of the pipe wall with respect to the period of time between two measurements. An important information for formulation of procedures of an integrated diagnostics is provided by a change of the pipe electrode potential in time, that indicates the ageing and separation of the insulation.

The next stage of fracture of gas pipeline is an increase in rate of corrosion in local places of insulation damage at the sites of pipe electrode potential change.

Restoration of a protective electrode potential of the pipe at the sites of its damage is performed by increasing

Відновлення захисного електродного потенціалу труби на ділянках його зрушення здійснюється шляхом збільшення кількості катодних станцій та їх потужності. Зростання потенціалу (зрушення в негативний бік) на ділянках порушення ізоляції створює умови для катодного виділення водню. Підвищуються також струми захисту, рівень яких є інформативним параметром діагностики, що визначає можливість подальшого процесу локального катодного виділення водню.

Наслідком підвищення щільності струму є локальне катодне виділення водню на зовнішній поверхні трубопроводу. Аналіз його механізмів показує, що в результаті протікання цього процесу можливе виділення газоподібного молекулярного водню або утворення атомарного водню. Перше призводить до спучення і відшаровування ізоляції. На окремих ділянках трубопроводів у вологому ґрунті були зафіксовані газові бульбашки між трубою та ізоляцією. Спучення і відшаровування ізоляції призводить до подальшого зрушення катодного потенціалу в позитивний бік. Атомарний водень завдяки подальшій об'ємній рекомбінації утворює молекули водню або відбувається його дифузія в метал. Наводнення є причиною локального окрихнення металу трубопроводу. Окрихнення виявляється в зниженні показників ударної в'язкості та в'язкості руйнування, в підвищенні твердості і збільшенні відношення межі текучості до часового опору зародженню тріщин.

При комплексному діагностуванні газопроводів наявність окрихнення металу в місцях шурфовки визначається виміром твердості.

Розроблена методика оцінки потенційно небезпечних ділянок трубопроводів з точки зору можливого утворення дефектів дає можливість подальшого ефективного використання різних методів оцінки стану матеріалу труби, таких як акустична емісія (АЕ), вимірювання твердості, напружено-деформованого стану, ультразвукового контролю, розрахункових методів та інш.

Контроль найбільш небезпечних дефектів може проводитися методом АЕ. Цей метод може бути основою поточного виробничого контролю.

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ПК ANWELD).** М. Р. Нургужин, Т. Я. Кацага (Гос. техн. ун-т, г. Караганда, Республика Казахстан). Создан ряд компьютерных систем прогнозирования ресурса сварных конструкций. Большинство из них далеки от инженерной практики либо в силу сложности эксплуатации (требуется серьезная теоретическая подготовленность), либо из-за узкой специализации компьютерной системы. ПК ANWELD, предназначенный для широкого использования при проектировании современных металлоконструкций, позволяет снизить затраты на эксплуатацию машины. Из всех современных высокоуровневых языков программирования (Windows 95) был выбран компилятор Delphi V3.0 прежде всего из-за доступности написания программного кода в среде компилятора, удобного интерфейса, широкого выбора визуальных компонентов, а также объектно-ориентированной направленности языка. Это позволило в удобной

the number of cathode stations and their capacity. Increase in potential (shifting to the negative side) at the sites of insulation damage creates the conditions for the cathode evolution of hydrogen. Currents of protection, whose level is an informative parameter of diagnostics which determines the possibility of the further process of a local cathode evolution of the hydrogen, are also increased.

A local cathode evolution of hydrogen at the external surface of the pipeline is the result of the current density increase. The analysis of its mechanisms shows that the possible evolution of gaseous molecular hydrogen or formation of atomic hydrogen as a result of proceeding of this process leads to swelling and separation of insulation. At separate sections of pipelines in a wet soil, gas bubbles between pipe and insulation were observed. Swelling and separation of insulation causes the shifting of the cathode potential to the positive side. The atomic hydrogen due to further volumetric recombination forms the hydrogen molecules or its diffusion to the metal occurs. Hydrogenation is a cause of a local embrittlement of the pipeline metal. The embrittlement decreases the characteristics of the impact strength and fracture toughness, increases the hardness and the ratio of the yield point to ultimate strength of crack initiation.

During integrated diagnostics of gas pipelines the embrittlement of metals in sites of pitting is determined by the hardness measurement.

The developed methodology of evaluation of potentially hazardous sites of pipelines from the point of view of possible formation of defects, gives an opportunity for a further effective use of different methods of assessment of pipe material condition, such as acoustic emission (AE), measurement of hardness, stress-strain state, ultrasonic testing, calculation methods, etc.

The most hazardous defects can be controlled by the acoustic emission method. This method can be a basis for the production line inspection.

#### ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE USING A PROGRAMMING COMPLEX PC ANWELD FOR PREDICTION OF LIFE OF WELDED STRUCTURES.

M.R. Nurguzhin, T.Ya. Katsaga (State Technical University, Karaganda, Kazakhstan). A number of computerized systems of prediction of the welded structure service life has been developed. Most of them are far from the engineering practice either due to complex conditions of service (where a serious theoretical preparation is required) or due to a narrow specialization of the computer system. PC ANWELD designed for a wide application in designing advanced metal structures can reduce the expenses for the machine service.

Among all modern high-level languages of programming (Windows 95) the compiler Delphi V3.0 was selected, first of all, due to possibility of describing a program code in the medium of the compiler, convenient interface, a wide selection of visual components, and also object-oriented language. This makes it possible to formalize the algorithm of operation of the developed software in a convenient form.

форме формализовать алгоритм работы создаваемого программного обеспечения.

Функционально программа состоит из трех частей: препроцессора (модуль подготовки данных для расчета); процессора; постпроцессора.

Исходные данные разделены на следующие основные части: определение схемы расчета, геометрических параметров расчета, данных по материалу, нагрузке, а также учет остаточных напряжений — с целью наиболее рационального способа хранения и доступа к информации. В качестве основных приняты критерии целостности и накопляемости данных, в связи с чем были спроектированы базы данных по «Схемам расчета», «Типу материала» и «Набору задач». Большое внимание уделялось также визуализации данных путем «имплантации» графических изображений внутрь базы данных. Процессор состоит из двух частей: определение статической, а также динамической трещиностойкости. Каждая из них дает возможность осуществления проектных и проверочных расчетов. Для визуализации процесса расчета в программе был специально разработан программный интерфейс между процессором и постпроцессором. Постпроцессор позволяет представить результаты расчета в удобном для пользователя виде (текстового отчета, графиков, диаграмм). Верификация описанного программного обеспечения была проведена на основе оценки остаточного ресурса сварной крановой металлоконструкции.

С целью определения нагруженности элементов осуществлен макроанализ крановой металлоконструкции. Для элементов с трещинами определены расчетные схемы, напряжения от внешней нагрузки и нерелаксированные остаточные напряжения. При оценке статической трещиностойкости использовали двухпараметрический критерий в терминах КИН, при определении остаточного ресурса — модифицированное уравнение Элбера.

#### **ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ ШВАХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКА.**

*В. П. Радько, В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).* Проведен комплекс исследований по обнаружению дефектов в сварных соединениях полиэтиленовых труб с использованием дефектоскопов УД2-12 и УЗ аппарата «Зипскан-3» (Англия).

В приборе «Зипскан-3» предусмотрены различные виды обработки результатов контроля, позволяющие повысить достоверность контроля, в частности увеличение контрастности изображения; выравнивание (сглаживание) боковой (головной) волны; режим синтезированной фокусирующей аппаратуры; вычитание усредненного по совокупности А-скана; линеаризация; получение огибающей.

Представлены обработанные в соответствии с приведенными выше операциями результаты контроля. Как видно из сопоставления данных, сигналы от дефектов после обработки более четко зафиксированы на фоне помех.

Изготовлены ультразвуковые преобразователи различных типов, предназначенные для контроля сварных соединений полиэтиленовых труб различных диаметров (100...600 мм) и толщин (6...60 мм).

При оценке достоверности контроля использовали разные соединения образцов, выполненных с нару-

As to the functions the program consists of three parts: a preprocessor (module for preparation of calculation data), a processor and a postprocessor.

Initial data are divided into the following main parts: determination of calculation scheme, calculation geometric parameters, data for material, loading, and also the allowance for residual stresses to have the most rational method of storage and access to information. Criteria of integrity and accumulation of data were taken as basic data and data banks were designed according to "Schemes of calculation", "Type of material" and "Setup of problems". A large attention was paid to the visualization of data by "implanting" graphical images inside the data banks.

Processor consists of two parts: determination of static and also dynamic crack resistance. Each of them gives a feasibility to make design and checking calculations. To visualize the calculation process in the program a program interface between the processor and postprocessor was specially developed. The postprocessor can present results of calculation in a form convenient for the user (text report, graphs and diagrams). Verification of the described software was made on the basis of evaluation of a residual life of the welded crane metal structure.

To determine the loading of elements a macroanalysis of the crane metal structure was made. Calculation schemes, stresses from external loading and nonrelaxed residual stresses were determined for elements with cracks.

Two-parametric criterion in terms of SIF was used in assessment of a static crack resistance and the residual service life was determined by a modified equation of Elber.

#### **DETECTION AND LOCALIZING OF DEFECTS IN PLASTIC WELDMENTS USING AN ULTRASOUND.**

*V.P.Redko, V.A.Troitsky (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).* A series of investigations were carried out on detection of defects in welded joints of polyethylene pipes using flaw detectors UD2-12 and US unit "Zipscan-3" (UK).

The "Zipscan-3" provides different types of processing the results of inspection, thus increasing the validity of inspection, in particular, the increase in image contrast; levelling (smoothing) of a lateral (head) wave; conditions of a synthesized focusing equipment; subtraction of averaged A-scan; linearization and the envelope obtaining. The inspection results processed in accordance with above-given operations are presented. As is seen from the data comparison the signals from as-processed defects are more clearly recorded on the background of interferences.

The ultrasonic transducers of different types designed for inspection of welded joints of polyethylene pipes of different diameters (100-600 mm) and thicknesses (6-60 mm) are manufactured.

In evaluation of inspection validity the different samples of joints made with a violation of the technological process of welding as well as welded joints of polyethylene pipes fractured during service were used. The welded samples with a poor air-tightness were examined. From

шениями технологического процесса сварки, а также сварные соединения полиэтиленовых труб, разрушенные в процессе эксплуатации. Исследовали сварные образцы с нарушениями герметичности. По внешнему виду и по размерам грата эти соединения в большинстве случаев соответствовали требованиям, предъявляемым при визуальном контроле. Как показали эксперименты, с помощью ультразвукового контроля эффективно обнаруживаются трещины, которые в процессе эксплуатации вызывают нарушение герметичности сварного соединения. Таким образом, посредством ультразвука проводится косвенная проверка герметичности сварных соединений полиэтиленовых труб.

Как показали исследования, при ультразвуковом контроле наиболее эффективно обнаруживаются непровары и трещины, а также раковины и поры. Достоверность обнаружения несплавлений, которые характеризуются наличием после разрушения образований «зеркальной» поверхности, значительно ниже.

#### УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ. В. П. Радько, В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Способ автоматической стыковой сварки оплавлением трубопроводов, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, широко внедрен в странах СНГ. За последние годы по этой технологии сварены десятки тысяч километров различных трубопроводов, в том числе в условиях Крайнего Севера.

В институте выполнен большой комплекс теоретических и экспериментальных работ, направленных на повышение эксплуатационной надежности сварных соединений. Накоплен большой статистический материал о свойствах соединений, характере возможных дефектов, влиянии этих дефектов на механические свойства соединений. В частности, установлено, что при стыковой сварке оплавлением дефекты появляются при нарушении технологии процесса, в результате чего в зоне соединения могут образоваться дефекты в виде несплавлений и шлаковых включений (неметаллических включений).

На основе статистической обработки сигналов от дефектов и структурных шумов разработана методика ультразвукового контроля (УЗК), которая позволяет обнаруживать шлаковые (неметаллические) включения малой толщины, апробированная как при ручном, так и при автоматизированном контроле. Разработана и испытана компьютеризированная система автоматического УЗК сварных соединений, выполненных контактно-стыковой сваркой.

Показано, что одновременное применение дифрагированных волн и метода «тандем» позволяет повысить достоверность контроля сварных швов, поскольку при этом уменьшается количество ложных сигналов от выпуклости шва, оставшейся при удалении грата. Достоверность контроля при выявлении несплавлений в соединениях, полученных с нарушением режима, составляла 96 %. При этом были обнаружены все дефекты. За счет наличия помех перебраковка составляла около 4 %.

При обнаружении шлаковых включений необходимо учитывать также помехи от структуры шва. Установ-

appearance and by the sizes of a flash these joints corresponded in most cases to the requirements specified for a visual inspection. As the experiments showed the ultrasonic testing can effectively reveal cracks which during service cause the lack of air-tightness in the welded joint. Thus, the ultrasound is used for indirect examination of air-tightness of welded joints of the polyethylene pipes.

As the examinations showed the ultrasonic testing is most effective in revealing lack of penetration and cracks and also cavities and pores. The validity of detection of lack of fusion is less effective due to presence of formations of a "mirror" surface after fracture.

#### ULTRASONIC QUALITY CONTROL OF JOINTS MADE BY THE AUTOMATIC FLASH-BUTT WELDING.

V.P.Radko, V.A.Troitsky (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). The method of automatic flash-butt welding of pipelines, which was developed at the Paton Institute, is widely used in CIS. Over the recent years the tens of thousands of kilometers of different pipelines, including those used under the conditions of Extreme North, were welded using this technology.

At the Institute a large complex of theoretical and experimental works, directed to the improvement of a service reliability of the welded joints, has been accomplished. A comprehensive statistic information has been accumulated concerning properties of joints, nature of possible defects, effect of these defects on the mechanical properties of the joints. It was established, in particular, that defects during the flash-butt welding are appeared at the violation of the process technology, resulting in the formation of defects in the form of lack of fusion and slag (non-metallic) inclusions in the joint zone.

On the basis of a statistic processing of signals from defects and structural noises, the procedure of the ultrasonic testing (UST) was developed which makes it possible to reveal the slag (non-metallic) inclusions of a small thickness. This procedure was tested both in manual and automatic inspection. A computerized system of the automatic UST of welded joints made by the flash-butt welding has been developed and tested.

It is shown that the simultaneous application of diffracted waves and "tandem" methods can increase the truth of control of welds, as here, the amount of false signals from the weld convexity, remained after the flash removing, is decreased. The truth of control during detection of non-fusions in the joints, as a result of violation of the process, was 96 %. In addition, all the defects were detected. Due to the presence of interferences the faulty rejection was about 4 %.

When detecting the slag inclusions it is necessary to take also into account the interferences from the weld structure. It was established, that when the ultrasonic waves are induced by the transducers, connected by the "tandem" scheme under the 45° angle to the plane of the joint zone and at 2.5 MHz frequency of ultrasonic

лено, что при вводе ультразвуковых волн преобразователями, включенными по схеме «тандем» под углом 45° к плоскости зоны соединения, и при частоте ультразвуковых колебаний 2,5 МГц уровень амплитуды эхо-сигналов от таких дефектов на 4...6 дБ выше среднего уровня эхо-сигналов от структуры металла зоны сварки бездефектного соединения. В данном случае дефекты обнаруживаются с достоверностью 75 %.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ. В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Изложен практический опыт использования компьютеризированных ультразвуковых аппаратов для УЗК трубопроводов, гибов, сосудов и других элементов энергетического оборудования, которые в результате применения ординарных средств УЗК дают упрощенные представления о дефектности металла. На основе информации, полученной при помощи компьютеризированной техники, отменялись заключения, принятые ранее по результатам обычного УЗК.

Компьютеризированные ультразвуковые дефектоскопы, в отличие от ординарных, позволяют:

- обрабатывать огромные массивы информации, записывая весь спектр отраженных сигналов;
- графически представлять образ дефектной зоны, содержащей большое количество допустимых дефектов, что часто исключает возможность продолжения эксплуатации металлоконструкции;
- анализировать расположение и образ дефекта или дефектной зоны в разных ракурсах;
- анализировать расположение и образ дефектов при варьировании браковочным уровнем и т.п.;
- выполнять статистическую обработку отраженных сигналов определенного уровня и построение соответствующих графиков;
- реализовывать метод дифракционных волн и точно определять размеры дефектов, их расположение;
- запоминать и сравнивать информацию большого количества однотипных испытаний, выполненных в разное время и разными типами преобразователей и т.п.;
- сравнивать результаты УЗК, выполненного разными преобразователями, на разных частотах, при различных видах сканирования и т.п.

С распространением компьютеризированных дефектоскопов необходимо изменить нормы на УЗК, закладываемые в СНиПы и другие нормативные документы.

#### О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ «РЕАНИМАЦИИ» В УКРАИНЕ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОРАДИОГРАФИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ ШВОВ И МАТЕРИАЛОВ. В. А. Филиппенков, В. Л. Найда, В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. М. Пышный (Энергоатом контроль-сервис, г. Энергодар, Украина).

Из множества методов неразрушающего контроля материалов и сварных соединений наибольшее распространение получила радиография, отличающаяся высокой чувствительностью, наглядностью и документальностью. Однако пленочной радиографии присущи такие существенные недостатки, как высокая стоимость, малая оперативность, потребность в оборудованных фотолабораториях, химикатах, водоснабжении и др. Из альтернативных методов наилучшие результаты

oscillations, the level of amplitude of the echo-signals from these defects are by 4-6 dB higher than the mean level of the echo-signals from the structure of the welding zone of the defectless joint. In this case the defects are detected with the 75 % truth.

#### PROSPECTS OF APPLICATION OF COMPUTERIZED ULTRASONIC FLAW DETECTORS. V.A. Troitsky (The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

The practical experience in application of computerized ultrasonic units for UST of pipelines, bends, vessels and other elements of the power equipment is described in comparison with the results obtained by using the ordinary UST means, which give simplified information about the metal defectness. On the basis of information obtained by the computerized units the conclusions taken earlier by the results of ordinary UST were rejected.

The computerized ultrasonic flaw detectors, unlike the ordinary units, can:

- process large files of information with recording of all the spectrum of the reflected signals;
- present graphically the image of a defective zone which has a large amount of admissible defects, that often prevents the possibility to continue the service of the metal structure;
- analyze the location and image of a defect or a defective zone in different aspects;
- analyze the location and image of defect by varying a rejection level, etc.;
- make statistic processing of reflected signals of a definite level and plot appropriate diagrams;
- realize the method of diffraction waves and define precisely their sizes of defects and their location;
- store and compare the information of a large number of similar-type tests performed at different times and with different types of transducers, etc.;
- compare the results of UTS performed with different transducers at different frequencies and different types of scanning, etc.

With a wide application of the computerized flaw detectors it is necessary to change the standards for UST in different standardized documents.

#### ABOUT REHABILITATION OF WORKS ON ELECTRO-RADIOGRAPHIC CONTROL OF WELDS AND MATERIALS IN UKRAINE. Filippenkov V.A., Naida V.L., Troitsky V.A. (The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine), Pyshnyi V.M. (Energoatom Control Service, Energodar, Ukraine).

Among the variety of methods of NDT of materials and welded joints the radiography, which is characterized by a high sensitivity, visibility and document validity, found the widest application. However, the film radiography has a number of typical drawbacks, such as a high cost, low response, need in equipped photographic laboratories, chemical agents, water supply, etc. Among alternative methods the best results are provided by an electroradiography (ERG), which does not require application of silver-containing materials and chemical photographic processing and

обеспечивает электрорадиография (ЭРГ), не требующая применения серебросодержащих материалов и химической фотообработки, характеризующаяся высокой экспрессностью и экономичностью и в то же время не уступающая пленочной радиографии в чувствительности и разрешающей способности. Детекторами в ЭРГ служат пластины или цилиндры с фотополупроводниковым слоем (как правило, аморфного селена). Очувствление (сенсibilизация) детекторов, сухое проявление наэлектризованным порошком получаемого при экспонировании скрытого электростатического изображения, перенос порошкового изображения (ЭРГИз) на обычную бумагу и фиксирование электрорадиограмм осуществляют при помощи аппаратуры для ЭРГ. Очевидно, что качество ЭРГИз определяется как свойствами детектора, так и характеристиками аппаратуры. И если вопрос с детекторами давно практически решен, то исследования конструктивных параметров аппаратуры и их влияние на качество ЭРГИз до недавнего прошлого носили эпизодический характер, а аппаратура создавалась методом проб и ошибок. И лишь с середины 1970-х гг. началось выполнение комплекса работ, обеспечивших научно обоснованное конструирование аппаратуры для ЭРГ. Заметный вклад в совершенствование основных технологических устройств внесли и НИР, и ОКР специалистов ИЭС им. Е. О. Патона. Наиболее значительными из их работ стали исследование и разработка устройств сенсibilизации, основанных на коронном разряде. Была установлена зависимость качества ЭРГИз от распределения коронного тока через электризуемый детектор; построена физическая модель кинетики коронного разряда с тонких проволоки-электродов и получено ее аналитическое выражение; разработаны способ повышения равномерности распределения коронного тока через электризуемую поверхность и конструкция коронирующего электрода, обеспечивающая высокую равномерность коронирования; построена обобщенная конструктивная модель зарядных устройств, разработана методика расчета основных геометрических и электрических параметров этих устройств; созданы три модификации устройств сенсibilизации детекторов в статическом и динамическом режимах. Кроме того, авторами усовершенствовано устройство полутонкового проявления и разработан принципиально новый механизм очистки детекторов от остатков проявляющего порошка, исключающий повреждение нежного селенового слоя и значительно повышающий качество очистки. Комплекс проведенных работ обусловил создание отечественной аппаратуры типа ЭРЕНГ, получившей высокую оценку отечественных и зарубежных специалистов-рентгенологов и награжденной дипломами и грамотами. Тем не менее многие проблемы как технического, так и организационного характера ждут своего решения до настоящего времени. Это и потребность в новых методах фиксирования, и повышение информативности за счет многоцветного проявления, и широкие возможности ротационной ЭРГ с получением изображений длинномерных сварных швов на рулонной ленте, а самое главное — организация серийного выпуска модернизированной аппаратуры и разработка директивных документов.

which is characterized by a quick response and low cost and, at the same time, is not inferior to the film radiography as to the sensitivity and resolution. Detectors in ERG are the plates or cylinders with a photographic conductive layer (as a rule, of amorphous selenium). Sensibilization of detectors, dry developing with electrified powder obtained in exposition of a latent electrostatic image, transfer of a powder image on an ordinary paper and fixation of electroradiograms are performed using equipment for ERG. It is evident that the quality of the powder image is determined both by properties of a detector and the characteristics of the equipment. If the problem with detectors has been almost solved long ago, then the examination of design parameters of the equipment and their effect on the image quality till recently had an episodic nature and the equipment was designed by the trial-and-error method, and only from the middle of 1970s the integrated studies were started to ground the designing of the ERG equipment. Specialists of the Paton Institute made a noticeable contribution to the improvement of main technological devices. Among these works the investigation and development of devices for sensibilization based on a corona discharge can be outlined. The relation between the quality of image and distribution of a corona current through an electrized detector was established, physical model of kinetics of a corona discharge from thin wire-electrodes was constructed and its analytical reproduction was obtained. Method of increasing the uniformity of corona current distribution through an electrized surface and design of a corona electrode which provides a high uniformity of coroning are developed; generalized design model of charging devices is constructed and the procedure of calculation of main geometrical and electrical parameters of these devices was developed and three modifications of devices of sensibilization of detectors under static and dynamic conditions are created. In addition, the authors updated a device of a half-tone developing and a radically new mechanism of cleaning detectors from the remnants of a developing powder was designed, which excludes the damage of a soft selenium layer and increases the quality of cleaning. A series of works carried out promoted the creation of the domestic equipment of ERENG type which was highly recognized by domestic and foreign X-ray specialists and awarded with diploma and certificates. Nevertheless, many problems both of a technical and organizing nature are waiting for their solution until now. This is a need in new methods of fixation, and improvement of information-content due to a multicolor developing and also wide possibilities of rotary ERG for producing image of long welded joints in a coiled tape, and, the most important, the organizing of a serial production of advanced equipment and working-out of instructive documents.

**РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ.** Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа, Р. Н. Калугин (ВТИ, г. Москва, РФ). Согласно результатам статистического анализа, эксплуатационная повреждаемость сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей в условиях ползучести зависит от следующих факторов:

- температурных условий ползучести (с увеличением температуры эксплуатации от 510 до 545...560 °C повреждаемость возрастает на порядок);
- конструкционного фактора (в среднем 90 % повреждений зафиксировано в сварных соединениях с повышенной концентрацией напряжений — тройниковых, штуцерных и стыковых соединениях разнотолщинных трубных элементов — и около 10 % повреждений — в стыковых соединениях паропроводных труб равной толщины);
- технологического фактора (примерно 92 % повреждений развивается по разупрочненной прослойке металла зоны термического влияния — трещины IV типа — и около 8 % повреждений по металлу шва стали 09Х1МФ);

• комплексное влияние эксплуатационных, конструкционных и технологических факторов. Ресурс сварных соединений для расчетной температуры 545 °C при нормальных условиях эксплуатации по данным ВТИ составляет:

- до 300...400 тыс.ч для стыковых соединений труб;
- до 150...250 тыс.ч для стыковых соединений разнотолщинных трубных элементов;
- до 60...150 тыс.ч для тройниковых и штуцерных соединений.

В числе комплексных мер по повышению эксплуатационной надежности сварных соединений и дальнейшему продлению их ресурса приоритетными являются следующие:

- совершенствование методов статистического анализа надежности сварных соединений. Разработана структура паспортных данных характеристики сварных соединений, которая включена в алгоритм экспертизы живучести соединений паропроводов;
- совершенствование расчетно-экспериментальных методов оценки остаточного ресурса сварных соединений. Разработаны методики оценки по предельному состоянию металла и по фактическим нагрузкам. Установлены оптимальные области испытаний в координатах напряжение-температура с целью получения корректных результатов экспериментов по определению жаропрочности сварных соединений;
- совершенствование методов диагностирования для оценки остаточного ресурса сварных соединений по структурному фактору. Разработаны методики металлографического анализа с реплик для оценки состояния металла соединений по микроповрежденности на реальных соединениях паропроводов;
- разработка и совершенствование сварочно-термической технологии восстановления работоспособности сварных соединений. Разработан комплекс технологий, в том числе по ремонту повреждающихся при эксплуатации сварных соединений коллекторов котлов и паропроводов, по восстановительной термической обработке на оптимальных режимах нормализации с отпуском соединений паропроводов, по сварочной технологии ремонта корпусных дета-

**SERVICE LIFE AND DIAGNOSTICS OF WELDED JOINTS OF STEAM PIPELINES.** F.A.Khromchenko, V.A.Lappa, R.N.Kalugin (VTI, Moscow, Russia). According to results of a static analysis the service damage of welded joints in steam pipelines made of heat-resistant Cr-Mo-V steels under the creep conditions depends on the following factors:

- temperature conditions of creep (with increase in service temperature from 510 up to 545–560 °C the damage increases by one order);
- design factor (90 % damages was observed on average in welded joints with a high concentration of stresses, such as T-, connecting and butt joints of tube elements of different thicknesses and about 10 % of damages - in butt joints of steam pipes of equal thickness);
- technological factor (approximately 92 % of damages are propagated along the weakened layer of HAZ metal, cracks of IV type, and about 8 % of damages in weld metal of steel 09Kh1MF);
- complex effect of service, design and technological factors.

The service life of welded joints for a calculated temperature 545 °C under normal service conditions according to VTI data is as follows:

- up to 300 000–400 000 h for butt welded joints of pipes;
- up to 150 000–250 000 h for butt joints of tubular elements of different thickness;
- up to 60 000–150 000 h for T- and connecting joints.

The priority measures for increasing service reliability of welded joints and further extension of their service life are the following:

- improvement of methods of statistic analysis of reliability of welded joints. Structure of passport data of characteristics of welded joints is developed and included into algorithm of expertise of "vitality" of joints of steam pipelines;
- improvement of design-experimental methods of evaluation of residual life of welded structures. Methodologies of evaluation by a limiting state of metal and real loads are developed. Optimum fields of tests in stress-temperature coordinates were established to obtain true results of experiments on determination of heat resistance of welded joints;
- improvement of methods of diagnostics for evaluating residual life of welded joints by a structural factor. Procedures of a metallographic analysis from replica were developed to evaluate the state of the joint metal by a microdamages on real joints of the steam pipelines;
- development and improvement of welding-heat treatment technology of restoration of serviceability of the welded joints. A series of technologies was developed, including the repair of service-damaged welded joints of collectors of boilers and steam pipelines, for a restoration heat treatment at optimum conditions, normalizing with tempering of joints of pipelines, on welding technology of repair of casing components of power equipment without postweld heat treatment. Directive production, technological and standardizing-technical documents, approved or coordinated with Gosgortekhnadzor of Russia came into force;

лей энергооборудования без послесварочной термической обработки. Введены в действие руководящие производственно-технологические и нормативно-технические документы, утвержденные или согласованные Госгортехнадзором России;

- совершенствование регламента по контролю металла и продлению срока службы паропроводов, включая сварные соединения.

Введены в действие новые руководящие технические документы, утвержденные Госгортехнадзором России.

#### ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ. И. Я. Шевченко, В. А. Троицкий, П. В. Федоряка (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Если зона перекрытия наружного и внутреннего швов в прямошовных трубах составляет примерно 0,25 ширины валика выпуклости шва и менее, а зона ультразвукового (УЗ) контроля равна ширине шва или больше, то дефекты в зоне термического влияния (ЗТВ) частично попадают в зону обнаружения и фиксируются при автоматизированном УЗ контроле. Классифицировать эхо-сигналы от дефектов в шве и ЗТВ можно путем использования различных классификационных признаков — амплитудного, временного или изучения индикатрисы рассеяния от дефектов.

Естественные дефекты, встречающиеся в сварных соединениях труб, различаются формой отражающей поверхности (конфигурация, шероховатость), а также местоположением в шве и ЗТВ.

В металле прикомочной зоны встречаются вытянутые вдоль проката железомарганцовистые сульфиды, часто вместе с оксидами ванадия, сложной шпинелью, стеклами. Размер этих включений 5,0...2,5 мкм. Их балл загрязненности по сульфидам составляет 2...3, по оксидам и силикатам — 2...5. Они представляют собой строчки сложных оксидов и стекол, грубые строчки полупластинчатых стекол в сочетании с оксидами и сульфидами. Размер строчек в исследованных образцах достигает 120 мкм и более. Такие неметаллические включения встречаются по всей толщине металла, в том числе в приповерхностной зоне.

Исследованиями установлено, что поверхность дефекта, на которую падает УЗ волна, может отражать звук диффузно, когда индикатриса рассеяния имеет практически круговую диаграмму; полудиффузно, когда максимальная часть энергии УЗ волны отражается зеркально, а часть — диффузно; зеркально, когда максимум энергии отражается под углом, равным углу падения УЗ волны на поверхность дефекта. Отличительной особенностью шероховатой плоской поверхности от зеркальной при падении на нее УЗ волны является длина волны УЗ колебаний. Если высота шероховатости составляет менее 1/3 длины волны, то поверхность рассматривается как зеркальная.

Экспериментальные исследования характеристик отражения от дефектов типа непроваров, трещин и строчечных включений в ЗТВ показали, что от непровара основная часть звуковой энергии отражается зеркально, т. е. имеется четко выраженный максимум под углом, равным углу падения УЗ волны.

- improvement of regulation of metal inspection and extension of service terms of steam pipelines including welded joints.

#### PECULIARITIES OF ULTRASONIC TESTING OF WELDED JOINTS IN PIPES OF GAS AND OIL PIPELINES DURING THEIR PRODUCTION. I.Ya.Shevchenko, V.A.Troitsky, P.V.Fedoryaka (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

If the zone of overlapping of external and inner welds in straight welded pipes is approximately 0.25 of the width of bead of a weld convexity and less, and the zone of ultrasonic (US) testing is equal to the weld width and higher, than defects in HAZ enter partially the zone of detection and they are recorded during automatic US testing. It is possible to classify echo-signals from defects in weld and HAZ by using different classified features, such as: amplitude, time or study of indicatrix of dissipation from defects. Natural defects occurring in pipe welded joints are distinguished by a shape of a reflecting surface (configuration, roughness) and also by location in weld and HAZ.

In metal of a near edge zone the elongated Fe-Mn sulphides along the rolling often together with vanadium oxides, a complex spinel and glasses are observed. The size of these inclusions is 5.0–2.5  $\mu\text{m}$ . Their degree of contamination by sulphides is 2–3, by oxides and silicates — 2–5. They represent lines of complex oxides and glasses, rough lines of semilaminar glasses in combination with oxides and sulphides. The size of lines in examined samples reaches 120  $\mu\text{m}$  and more. Such non-metallic inclusions are observed across the whole thickness of metal including the near-surface zone.

The examinations showed that the defect surface to which the US wave falls can reflect the sound diffusively when the indicatrix of dissipation has an almost circular diagram and semidiffusively when a maximum part of US wave energy is mirror-reflected and a part of it — diffusively; and it is mirror-reflected when the maximum energy is reflected under an angle equal to the angle of incidence of US wave to the defect surface.

The length of US wave oscillation is the feature which distinguishes the rough plane surface from the mirror surface at US wave incidence on it. If height of roughness is less than 1/3 of wave length, then the surface is regarded as mirror.

The experimental examinations of characteristics of reflection from defects of lack-of-penetration type, crack and line inclusions in HAZ showed that the main part of a sound energy from the lack-of-penetration has the mirror reflection, i.e. there is a clearly expressed maximum at an angle equal to the angle of US wave incidence.

The reflection of US waves of such defects as cracks in weld and line inclusions in the HAZ has a semi-diffusive nature due to the roughness of the defect reflecting surface. However, the reflection from the line inclusions in HAZ has a clearly expressed maximum at an angle of reflection equal to the angle of incidence in a mirror

Отражение УЗ волны от таких дефектов, как трещины в шве и строчечные включения в ЗТВ, имеет полудиффузный характер за счет шероховатости отражающей поверхности дефекта. Однако отражение от строчечных включений в ЗТВ имеет четко выраженный максимум под углом отражения, равным углу падения в зеркальном направлении, а также менее интенсивные отражения под углами, отличными от зеркального. Отражение от трещин характеризуется более «расплывчатым» максимумом в зеркальном направлении и отражением под углами, отличными от зеркального. Для разделенной регистрации дефектов шва и ЗТВ разработана технология и установка для автоматизации УЗ контроля.

**ПОВЫШЕНИЕ ОБЪЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПУТЕМ КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО ПРОЦЕССА.** А. Л. Шекеро, В. А. Троицкий (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Рассмотрены преимущества и недостатки сдачи общего и специального экзаменов при сертификации специалистов, занятых проведением неразрушающего контроля промышленных объектов.

Необходимость перехода на компьютерный вариант сдачи теоретических экзаменов была вызвана стремлением Органа по сертификации персонала Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД) к повышению объективности при проведении и оценивании экзаменов. В стандарте УО НКТД «Система сертификации персонала по неразрушающему контролю» закреплено положение EN 473 о том, что единственным экзаменатором кандидата не может быть специалист, который принимал участие в подготовке данного кандидата, или же его работодатель, или работающий в той же организации, что и экзаменатор. Это положение способствует повышению объективности при оценивании экзамена, однако оно не исключает субъективного фактора полностью.

Переход к компьютерному экзамену позволит исключить человеческий фактор при проведении и оценивании теоретических экзаменов. Компьютерный экзамен имеет и другие преимущества для всех участников сертификации, которые заключаются в следующем:

- ответы будет оценивать беспристрастный компьютер, которому безразличны отношения кандидата с работодателем в прошлом, должность кандидата, его социальный статус, возможности кандидата как потенциального работодателя экзаменатора и др. (для кандидата);
- чисто психологически трудно выставить непроходной балл кандидату, когда знаешь, что в лучшем случае кандидат может проиграть в финансовом отношении, а в худшем — вообще потерять работу (для экзаменатора);
- более полное доверие работодателя к результатам сертификации, даже в том случае, когда специалист не сертифицируется (для органа по сертификации);

direction and also the less intensive reflections at angles different from those of mirror reflections. The reflection from cracks is characterized by a more "smashed" maximum in the mirror direction and reflection at angles different from a mirror reflection. Technology and equipment for US control automation have been developed to have a separate recording of defects of the weld and HAZ.

**IMPROVEMENT IN OBJECTIVITY OF RESULTS OF CERTIFICATION OF NDT SPECIALISTS BY COMPUTERIZING THE EXAMINING PROCEDURE.** A.L. Shekero, V.A. Troitsky (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Advantages and drawbacks in passing general and special exams in certification of specialists involved in NDT of industrial objects are considered.

The necessity of transition to a computerized version of passing theoretical exams was caused by the aim of Body of Certification of personnel of the Ukrainian Society of Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics (US NDTTD) to increase the objectivity in conductance and estimation of exams.

In standard of US NDTTD "System of Certification of NDT personnel" the statement EN 473 indicates that the specialist cannot be the only examiner of the candidate who took part in training this candidate or gave him work, or worked at the same organization. This statement promotes improvement of objectivity in exam estimation, however, it does not exclude completely a subjective factor.

Transition to the computer exam will make it possible to exclude a human factor in conductance and estimation of theoretical exams. The computer exam has another advantages for all participants of certification, which are as follows:

- answers will be estimated by an unbiased computer which is indifferent to the relations between the candidate and employer in the past, position of the candidate, his social status, capabilities of the candidate as a potential employer of the examiner, etc. (for candidate);
- it is difficult from the psychological point of view to put an impassable estimate to candidate when it is known that he can have financial losses, in the better case, while in the worst case — to lose the work (for examiner);
- more complete trust of employer to the results of certification even in the case when specialist is not certified (for the body of certification);
- decrease in cost of certification at the expense of reduction in time spent by the examiners for checking the answers of candidates (for employer).

The existing Ukrainian structure of questions of the general exam includes the questions with various selection. A part of questions of a special exam has a similar structure. Consequently, the transition of the general and a

• снижение стоимости сертификации за счет сокращения времени, затрачиваемого экзаменаторами на проверку ответов кандидатов (для работодателя). Существующая в Украине структура вопросов общего экзамена — это исключительно вопросы с множественным выбором. Аналогичную структуру имеет и часть вопросов специального экзамена. Следовательно, перевод общего и части специального экзамена на компьютерный вариант абсолютно логичен и не требует от кандидата особых навыков владения компьютером (достаточно нажатия нескольких клавиш по подсказкам на мониторе компьютера). Соответствующие компьютерные программы для некоторых методов неразрушающего контроля, уровней квалификации, производственных секторов уже разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона и используются в двух экзаменационных центрах Украины. Конечно, вопросы и ответы должны быть полностью корректными и абсолютно однозначными. Поэтому перед переходом к компьютерному варианту вопросы и ответы полностью отработываются и проверяются на нескольких письменных экзаменационных сессиях.

Что касается той части специального экзамена, которая требует повествовательных ответов, оценить такой ответ компьютер не может, даже если кандидат в достаточной степени владеет клавиатурой компьютера. Поэтому такие вопросы специального экзамена пока могут оцениваться только экзаменатором.

Предлагаемая система сдачи и оценивания квалификационных экзаменов апробирована и используется в Аттестационном центре неразрушающего контроля при ИЭС им. Е. О. Патона.

#### **РАЗРАБОТКА СПОСОБА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ НЕПРОВАРОМ. А. Л. Шекеро (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).**

Технология сварки некоторых видов сварных соединений предусматривает остающийся технологический непровар в корне шва. При этом соответствующей нормативной документацией устанавливается его максимальный размер. Проблемой ультразвукового контроля сварных соединений с технологическим непроваром является сложность распознавания эхо-сигналов от дефектов на фоне эхо-сигналов, обусловленных технологическим непроваром в корне шва.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона были выполнены экспериментальные исследования на моделях сварных соединений цилиндрических изделий и на реальных изделиях с технологическим непроваром с последующими разрушающими испытаниями. Целью этих исследований был выбор способа и параметров ультразвукового контроля для цилиндрических объектов разной толщины и с различными размерами технологического непровара. Разработанный способ ультразвукового контроля таких сварных соединений позволяет по амплитуд-

part of a special exam to the computer version is quite logical and does not require special habits of candidates in using computer (it is enough to press several keys from suggestions on the computer monitor). Appropriate computer programs for some NDT methods, levels of qualification, industrial sectors have been already developed at the E.O.Paton Electric Welding Institute and used in two examining centers of Ukraine. Certainly, the questions and answers should be completely correct and absolutely ambiguous. Therefore, before transition to the computer version the questions and answers are completely tested and checked in several written examining sessions.

As to that part of a special exam which requires the narrative answers, then the computer cannot estimate this answer even when the candidate can use the computer keys properly. Therefore these questions of the special exam can be estimated now only by the examiner.

The suggested system of passing and estimating qualification exams was tested and used in Attestation Center of NDT at the E.O.Paton Electric Welding Institute.

#### **DEVELOPMENT OF A METHOD OF UST OF WELDED JOINTS WITH A TECHNOLOGICAL LACK OF PENETRATION. Shekero A.L. (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).**

The welding technology of some types of welded joints envisages the technological remaining lack of penetration in the weld root. Here, its maximum size is set by an appropriate standardized documentation. The ultrasonic testing (UST) of welded joints with a technological lack of penetration is rather complicated by a detection of echo-signals from defects on the background of echo-signals caused by technological lack of penetration in a weld root.

The Paton Institute has made experimental investigations on the models of welded joints of cylindrical products and on real weldments with a technological lack of penetration with next fracture tests. These investigations were aimed at the selection of a method and parameters of ultrasonic testing for cylindrical objects of different thicknesses and with different sizes of a technological lack of penetration.

The developed method of the ultrasonic testing of these welded joints can define the cause of initiation, exceeding of a maximum size of a technological lack of penetration, orientation and a shape of a discontinuity by the amplitude and time characteristics of the reflected signal. The use of three types of waves (longitudinal,

ным и временным характеристикам отраженного сигнала установить причину возникновения, превышение максимального размера технологического непровара, ориентацию и форму несплошности. Использование трех типов волн (продольных, поперечных и головных) позволяет повысить достоверность ультразвукового контроля за счет выявления несплошностей различного типа и ориентации. Предложенный иммерсионный способ ввода ультразвуковых волн в изделие позволяет контролировать сварные изделия, осуществляя сканирование не только в околосшовной зоне, но и непосредственно над сварным швом, что дает возможность повысить производительность контроля.

Создано специальное сканирующее устройство для реализации этого способа контроля и представления результатов контроля в виде развертки типа B-scan, разработана технология ультразвукового контроля сварных соединений цилиндрических изделий с технологическим непроваром.

transverse and principal) makes it possible to increase the truth of the ultrasonic testing by revealing of discontinuities of different types and orientation. The suggested immersion method of ultrasonic waves input to the weldment can control the latter by scanning not only in HAZ but also directly over the weld, that gives an opportunity to increase the inspection efficiency.

A special scanning device for realization of the method of this control and representation of results in the form of a scanning of the B-scan type and also technology of ultrasonic testing of welded joints of cylindrical objects with a technological lack of penetration have been developed.

**КОНТРОЛЬ  
КАЧЕСТВА,  
ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ДИАГНОСТИКА  
И ОЦЕНКА  
ОСТАТОЧНОГО  
РЕСУРСА СВАРНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

---

**QUALITY CONTROL,  
TECHNICAL  
DIAGNOSTICS  
AND EVALUATION  
OF RESIDUAL LIFE  
OF WELDED  
STRUCTURES**

**ДЕФОРМАЦИИ И РЕАКТИВНЫЕ МОМЕНТЫ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ШАХТНЫХ КРЕПЕЙ.**

*И. М. Альтер, Е. П. Воевода (Гос. техн. ун-т, г. Караганда, Республика Казахстан).* Перекрытия механизированных крепей представляют собой жесткую конструкцию коробчатого сечения, состоящую из двух продольных балок, соединенных между собой прямоугольным верхним листом, ребрами, перегородками, диафрагмами. Между балками расположены литые опоры гидростоек. При действии на шахтную крепь нагрузок от горного давления общее напряженно-деформированное состояние имеет сложный характер и зависит от ряда факторов, в том числе от наличия и характера распределения остаточных напряжений. Напряжения от горного давления в конструкции крепи суммируются с остаточными напряжениями. При этом в сварных узлах действуют внутренние изгибающие моменты, уравнивающие их реактивные моменты, а в листовом полотне — продольные и поперечные усадочные силы.

Реактивные моменты в сварных узлах вызываются их упругостью. Значения реактивных моментов пропорциональны внутренним изгибающим моментам от остаточных напряжений, усадочным силам и зависят от жесткости сварных узлов.

Получена зависимость для определения реактивных моментов. Для этого решено дифференциальное уравнение упругой линии листового полотна конструкции крепи, подкрепленного ребрами.

Действие реактивных моментов уравнивает внутренние изгибающие моменты от остаточных напряжений, в некоторой степени снижает деформативность листового полотна и увеличивает несущую способность конструкции.

Стабилизации напряженно-деформированного состояния конструкций крепей можно достичь в результате целенаправленного приложения внутренних изгибающих моментов в нужных сечениях (например, путем наплавления сварных валиков или размещения дополнительных ребер жесткости). При этом значения внутренних изгибающих моментов определяются по полученным зависимостям.

**ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРООБРАБОТКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ШАХТНЫХ КРЕПЕЙ.**

*И. М. Альтер, Е. П. Воевода (Гос. техн. ун-т, г. Караганда, Республика Казахстан), Г. Х. Насыров (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ).* Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные авторами показали эффективность снижения остаточных напряжений в результате применения виброобработки в режиме изменяющейся резонансной частоты. Виброобработка сварных конструкций шахтных крепей М130 и 20КП70 проводилась на частотах 36, 48, 52 Гц, причем конструкция опиралась на упругие опоры. Продолжительность вибрирования на каждой частоте составляла 20 мин. Под воздействием вибрации в конструкциях происходили неравномерные по сечению изменения остаточных напряжений. Снижение остаточных напряжений вблизи сварных швов достигало 65...70 %.

В основу методики испытаний заложен резонансный режим виброобработки сварных конструкций, при котором вынужденные напряжения, суммируясь с

**DEFORMATIONS AND REACTIVE MOMENTS IN WELDED STRUCTURES OF MINE SUPPORTS.**

*I.M.Alter, E.P.Voevoda (State Techn. Univ., Karaganda, Kazakhstan Republic).* The ceiling of mechanised supports, as a rule is a braced structure of box cross-section, consisting of two longitudinal beams connected by a rectangular upper sheet, stiffeners, partitions and diaphragms. Cast supports of hydraulic props are located between the beams. At the impact of loads from rock pressure on mine supports, the total stress-strain state is of a complex nature and depends on a number of factors, including the presence and nature of distribution of residual stresses. The stresses due to rock pressure in the support structure are added to the residual stresses. The inner bending moments act in the welded connections, balancing their reactive moments, and the longitudinal and transverse shrinkage forces develop in the sheet panels.

The reactive moments in the welded connections are caused by their elasticity. The values of the reactive moments are proportional to the inner bending moments due to residual stresses, shrinkage forces and depend on the welded connection rigidity.

A relationship has been derived to determine the reactive moments. The differential equation of the elastic line of a sheet panel in the support structure reinforced with stiffeners was solved for this purpose.

The action of the reactive moments places in equilibrium the inner bending moments due to residual stresses, somewhat lowers the sheet panel deformability and increases the load-carrying capacity of the structure.

Stabilisation of the stress-strain state of the support structures can be achieved by a purposeful application of the inner bending moments in the required sections (for instance, by deposition of weld beads or placing additional stiffeners). In this case the values of inner bending moments are determined from the derived dependencies.

**APPLICATION OF VIBRO-TREATMENT FOR DECREASE OF THE RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURES OF MINE SUPPORTS.**

*I.M.Alter, E.P.Voevoda (State Techn. Univ., Karaganda, Kazakhstan Republic), G.Kh.Nasyrov (N.E.Bauman MSTU, Moscow, Russia).* Experimental and theoretical investigations conducted by the authors showed the effectiveness of lowering the residual welding stresses by vibro-treatment in the mode of varying resonance frequency. Vibro-treatment of welded structures of M130 and 20KP70 mine supports was performed at the frequencies of 36, 48, 52 Hz with the structures resting on elastic supports. Vibration duration at each frequency was 20 minutes. Changes in residual stresses non-uniform across the cross-section, occurred in the structures under the impact of vibrations. Lowering of residual stresses near the welds was up to 65-70 %.

The testing procedure is based on the resonance mode of welded structure vibro-treatment in which the induced stresses adding up to the residual welding stresses promote the development of plastic deformations in the

остаточными сварочными напряжениями, способствуют образованию пластических деформаций в напряженных сечениях конструкций. В процессе виброобработки и снижения остаточных напряжений частота собственных колебаний конструкции уменьшается до 6...8 Гц.

Исследование колебаний при вибрационном способе обработки сводится к определению амплитудно-частотных характеристик для различных режимов, в зависимости от которых, а также от частоты свободных колебаний системы выбирают необходимую амплитуду колебаний и резонансную частоту. Разработана схема виброобработки напряженных конструкций, основанная на явлении смещения резонансной зоны. Согласно предлагаемой технологии, виброобработка начинается не в режиме резонанса, а входит в него постепенно, по мере снижения остаточных напряжений, смещения резонансной зоны и увеличения амплитуды колебаний.

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РУЧНОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСА.** Ю. П. Байшев (Урал. гос. архит.-худож. акад., г. Екатеринбург, РФ), Н. И. Дробышевский, А. С. Филиппов (Ин-т проблем безопасности в ядерной энергетике, г. Москва, РФ). Для ручной многопроходной сварки стального кожуха доменной печи (ДП) и воздухонагревателя (ВН) уточнена конечноэлементная методика расчета и изучены остаточные напряжения и деформации.

В расчетной модели приняты следующие допущения: задача является осесимметричной; материал считается упругопластическим, подчиняющимся критерию текучести Мизеса; зависящими от температуры являются предел текучести, модуль нормальной упругости, коэффициент термического расширения, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость. В расчетной схеме используют четырехугольные линейные и билинейные конечные элементы.

Температура сварки заметно превышает температуру плавления металла, который плавится, поглощая тепло, а при остывании отдает его в окружающую среду. Эти процессы учитывают при решении уравнения теплопроводности. Тепло сварочной дуги вводится с помощью потоковых граничных условий. Поток тепла сварочной дуги по пятну нагрева считается распределенным согласно гауссову закону. Предполагается, что для отдельного прохода сварной шов накладывают одновременно по всей длине. В численной модели проведено объединение двух проходов в один «макропроход» путем использования так называемого принципа отжигающего валика, согласно которому каждый последующий проход в значительной степени снимает и переопределяет, «отжигает» напряженно-деформированное состояние (НДС), возникшее в окрестности сварного шва на предыдущем проходе.

Изучены остаточные сварочные напряжения и деформации (СНД), образующиеся при сварке кольцевого шва в цилиндрической оболочке кожуха диаметром 10 м, выполненной из стали 09Г2С (Ст3) при К-образной разделке кромок. Определено поле

stressed sections of the structure. The frequency of the structure natural oscillations during vibro-treatment and residual stress lowering drops to 6-8 Hz.

Investigation of vibrations in the vibrational method of treatment is reduced to determination of the amplitude-frequency characteristics for various modes. The required value of vibration amplitude and the resonance frequency are selected depending on these characteristics and frequency of free oscillations of the system. A procedure of vibro-treatment of stressed structures based on the phenomenon of the resonance zone shifting, was developed. With the proposed technology, vibro-treatment does not start in the resonance mode, but gradually goes into it with lowering of residual stresses, resonance zone shifting and increase of oscillations amplitude.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES AND DEFORMATIONS IN MANUAL AND AUTOMATIC WELDING OF SHEET STRUCTURES OF A BLAST FURNACE COMPLEX.** Yu. P. Baishev (Urals State Academy of Architecture and Arts, Ekaterinburg, Russia), N. I. Drobyshevsky, A. S. Filippov (Institute of Safety Problems in Nuclear Power Industry, Moscow, Russia).

FEM calculation procedure has been determined more precisely and residual stresses and strains have been studied for manual multipass welding of a steel casing of a blast furnace (BF) and air heater (AH).

The following assumptions were made for the calculation model: the problem is regarded as axially symmetrical; the material is considered to be elastoplastic satisfying von Mises criterion; the yield point, normal modulus of elasticity, coefficient of thermal expansion, coefficient of heat conductivity and specific heat content depend on temperature. Rectangular linear and bilinear finite elements are used in the calculation procedure.

Welding temperature is significantly higher than the melting temperature of the metal which melts absorbing the heat and when cooling releases it into the environment. These processes are taken into account when solving the heat conductivity equation. The heat of the welding arc is incorporated through flow boundary conditions. The welding arc heat flow is considered to be distributed over the heated spot by the Gaussian law.

It is assumed that for an individual pass the weld is simultaneously deposited along the entire length. In the numerical model the two approaches were combined into one macroapproach based on the principle of the so-called annealing bead, according to which each subsequent pass considerably relieves and changes, namely anneals the stress-strain state (SSS) formed in the vicinity of the weld in the previous pass.

Residual welding stresses and strains (RWSS) were studied which form in welding of a circumferential weld with a K-shaped groove in the cylindrical shell of a blast furnace casing 10 m in diameter, made of 09G2S (St.3) steel. The temperature field and SSS in the calculated area during the welding process were determined and the bulk residual SSS was derived. The influence of the welded casing thickness and welding sequence on RWSS was analysed. It is shown that for the considered casing thicknesses (40, 50, 60 mm) and groove shape,

температур и напряженно деформированное состояние в расчетной области на протяжении сварочного процесса. Получено объемное остаточное НДС. Проанализировано влияние на СНД толщины свариваемого кожуха и порядка следования сварочных проходов. Показано, что для рассмотренных толщин кожуха (40, 50, 60 мм) и способа разделки кромок порядок следования проходов может качественно изменить картину распределения СНД.

Изложенная методика применена также для анализа СНД, возникающих при автоматической многопроходной сварке кожуха ДП (ВН). Полученные расчетные данные приведены для конечного состояния (остаточные напряжения) в виде изолиний напряжений, профилей напряжений и интенсивностей напряжений.

Установлено, что остаточные напряжения  $\sigma_x$ , действующие вдоль толщины сварного соединения, в 3-5 раз меньше напряжений  $\sigma_y$ . Наибольшего значения достигают сварочные напряжения  $\sigma_x$ , действующие вдоль толщины сварного шва (примерно в 2 раза больше, чем  $\sigma_y$ , и в 6-10 раз больше  $\sigma_z$ ).

Характер распределения напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  существенно различный. Например, для  $\sigma_x$  зона сжимающих напряжений находится на периферии сварного соединения, причем по толщине они распределены практически равномерно. Зона сжимающих напряжений  $\sigma_y$  расположена в толще кожуха симметрично сварному соединению.

Следует отметить достаточно равномерный характер распределения интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по толщине свариваемых листов и непрерывное нарастание значений  $\sigma_i$  от периферии к центру сварного соединения. При этом в области пластических деформаций (весь сварной шов, ЗТВ и часть основного металла) значение  $\sigma_i$  практически постоянно.

Сравнение этих результатов с данными расчета остаточных напряжений при ручной многопроходной сварке показывает, что в последнем случае они намного меньше, что, по-видимому, связано с меньшей погонной энергией, затрачиваемой для одного прохода при ручной сварке. Полученные расчетные результаты удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными других авторов.

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСА.** Ю. П. Байшев (Урал. архит.-худож. акад., г. Екатеринбург, РФ), В. И. Наседкин (АО «Уралмаш», г. Екатеринбург, РФ). Разработаны методика и компьютерная программа расчета вероятности безотказной работы и долговечности кожухов доменных печей (ДП) и воздухонагревателей (ВН) в зависимости от уровня напряженного состояния. Оценка надежности выполнена для наиболее нагруженных сечений кожухов ДП и ВН с использованием методики проекторного расчета.

В основу расчета положено условие прочности стальных строительных конструкций по первому предельному состоянию в виде вариационного неравенства

$$\sum S_i p_i \leq m_i F(k_1 R_1, k_2 R_2 \dots).$$

На основании теоремы о композиции гауссовых распределений вероятность безотказной работы кожуха

the welding sequence can produce a qualitative change in RWSS distribution pattern.

The described procedure was also applied for analysis of RWSS developing in automatic multipass welding of BF (AH) casing. The derived calculation data are given for the final state (residual stresses) in the form of stress isolines, stress profiles and stress intensities.

It is found that residual stresses  $\sigma_z$  acting across the welded joint thickness, are 3 to 5 times smaller than  $\sigma_y$  stresses. Welding stresses  $\sigma_x$  acting across the weld thickness have the highest values (approximately 2 times higher than  $\sigma_y$  and 6 to 10 times higher than  $\sigma_z$ ). The nature of distribution of  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  stresses is essentially different. For instance, for  $\sigma_z$  the compressive stress zone is on the welded joint periphery, they being practically uniformly distributed across the thickness. The zone of  $\sigma_y$  compressive stresses is located in the casing thickness symmetrically to the welded joint. Note a uniform enough nature of distribution of the intensity of  $\sigma_i$  stresses across the thickness of the sheets being welded and a continuous rise of  $\sigma_i$  values from the periphery to the welded joint center. In the plastic deformation region (all of the weld, HAZ and part of the base metal)  $\sigma_i$  value is practically constant.

Comparison of these results with the data of calculation of the residual stresses in manual multipass welding shows them to be much smaller in the latter case, this being, probably, related to a lower heat input consumed in one pass in manual welding. The derived calculation results agree well with the available experimental data of other authors.

#### ESTIMATION OF RELIABILITY CHARACTERISTICS OF SHEET STRUCTURES OF A BLAST COMPLEX.

Yu. P. Baishev, (Urals Academy of Architecture and Arts, Ekaterinburg, Russia), V. I. Nasedkin (AO Uralmash, Ekaterinburg, Russia). A procedure and computer program have been developed for calculation of the probability of no-failure operation and fatigue life of the casings of blast furnaces (BF) and air heaters (AH), depending on the stressed state level. Reliability estimation was performed for the most heavily loaded sections of BF and AH casings by a design calculation procedure.

Calculation is based on the condition of strength of steel building structures by the first limiting state in the form of a variational inequality

$$\sum S_i p_i \leq m_i F(k_1 R_1, k_2 R_2 \dots).$$

Proceeding from a theorem of Gaussian distributions composition, the probability of no-failure operation of the casing has been evaluated through the normal dis-

ха оценена с помощью закона нормального распределения. Среднеквадратическое отклонение составляющих факторов определено по правилу трех сигм в предположении распределения их по нормальному закону. В расчетах учтены вариация давления на кожух от футеровки, газа, шихты и чугуна, а также изменение толщины кожуха и футеровки, температуры внутреннего слоя футеровки, климатической температуры, коэффициента линейного расширения и расчетного сопротивления стали. Вероятность отказа в работе кожуха находили из выражения

$$P(\psi - \psi_0 > 0) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi \left[ \frac{\psi - \psi_0}{S(\Delta\psi - \Delta\psi_0)} \right],$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа;  $\psi, \psi_0$  — соответственно внешние и внутренние силы.

Оценка начальной безотказности кожуха получена по формуле

$$H_K = 1 - q.$$

Если в кожухе рассчитывается  $M$  сечений и потеря прочности любого из них ведет к потере работоспособности кожуха в целом, то вероятность отказа равна

$$Q_K = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - q_i),$$

где  $q_i$  — вероятность отказа  $i$ -го сечения кожуха. Надежность кожуха при этом составляет

$$H_K = 1 - Q_K.$$

Долговечность кожуха, в зависимости от уровня его напряженного состояния, определена на стадии зарождения и развития трещины. За меру напряженности кожуха принято отношение максимального напряжения к расчетному сопротивлению стали ( $k = \sigma_{\max}/R_y$ ). Вероятная оценка и расчет долговечности выполнены для двух наиболее нагруженных сечений кожуха ДП №6 НТМК и кожуха ВН.

Анализ результатов расчетов показал, что значения вероятности отказов кожухов ДП и ВН составляют соответственно 0,00675 и 0,015, а надежность их кожухов 99,3 и 98,5 %. При уровне напряженности  $k = 0,8$  вероятность безотказной работы кожухов ДП и ВН равна 1,0, а при  $k = 1,0$  она снижается до 0,5. С учетом изменчивости расчетных параметров границы изменения кольцевых напряжений в кожухе ДП достигают для сечения 1 — (186,2±72,3) МПа, для сечения 2 — (195,2±27,2) МПа; в кожухе ВН для сечения 1 — (211,7±58,5) МПа, для сечения 2 — (195,2±27,2) МПа. Для осевых напряжений получены аналогичные результаты.

Ресурс эксплуатации кожуха ДП при  $k = 0,7$  составляет 14,2 года, а при  $k = 1,0$ —3,2 года; кожуха ВН — соответственно 7,2 и 1,6 года. Разработанная методика позволяет оптимизировать вероятность безотказной работы и ресурс эксплуатации кожухов ДП и ВН в зависимости от уровня их напряженного состояния и изменчивости расчетных параметров.

tribution law. The mean-root-square deviation of the component factors was determined by the three sigma rule in the assumption of their distribution by a normal law. The calculations allowed for variation of the pressure of the lining, gas, charge and cast iron on the casing, as well as for the change of the thickness of the casing and lining, temperature of the lining inner layer, climatic temperature, linear expansion factor, and calculated resistance of steel.

The probability of casing failure in operation was found from the following expression:

$$P(\psi - \psi_0 > 0) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi \left[ \frac{\psi - \psi_0}{S(\Delta\psi - \Delta\psi_0)} \right],$$

where  $\Phi$  is the Laplace function;  $\psi, \psi_0$  are the external and internal forces, respectively.

The estimate of the initial no-failure operation of the casing was derived from the following equation:

$$H_c = 1 - q.$$

If  $M$  sections are calculated in the casing, and the loss of strength of any of them results in the loss of serviceability of the casing as a whole, the probability of failure is:

$$Q_c = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - q_i),$$

where  $q_i$  is the probability of failure of  $i$ th cross-section of the casing.

The casing reliability in this case is equal to:

$$H_c = 1 - Q_c.$$

The casing fatigue life depending on the level of its stressed state was determined at the stage of crack initiation and propagation. The ratio of maximal stress to the calculated resistance of steel ( $k = \sigma_{\max}/R_y$ ) was taken as the measure of the casing stress level. The probabilistic estimate and fatigue life calculation were performed for the two most heavily-loaded sections of №6 NТМК BF casing and AH casing.

Analysis of the calculation results has shown that the values of the probability of failure of BF and AH casings are 0.00675 and 0.015, and the reliability of their casings is 99.3 and 98.5 %, respectively. With the stress level  $k = 0.8$ , the probability of no-failure operation of BF and AH casings is equal to 1.0, and at  $k = 1.0$ , it is lowered to 0.5.

Considering the variability of the design parameters, the limits of variation of circumferential stresses in BF casing are up to (186.2±72.3) MPa for section 1, and (195.2±27.2) MPa for section 2; in AH casing for section 1 — (211.7±58.5) MPa, and for section 2 — (195.2±27.2) MPa, respectively. Similar results have been derived for axial stresses.

The service life of BF casing at  $k = 0.7$  is 14.2 years, and at  $k = 1.0$ —3.2 years; that of AH casing being 7.2 and 1.6 years, respectively. The developed procedure enables optimisation of the probability of no-failure operation and service life of BF and AH casings, depending on the level of their stressed state and variability of the calculated parameters.

**КОРРОЗИЙНО-МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОАЗОТНИХ СТАЛЕЙ.** О. І. Балицький, О. О. Крохмальний (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, м. Львів, Україна); І. Ф. Костюк (ДАЕК Західенерго, м. Львів, Україна). Високоазотні аустенітні сталі відрізняються унікальними міцнісними характеристиками. Високого рівня зміцнення шляхом холодного деформування (до 3000 МПа) вдається досягти завдяки високому вмісту азоту (до 1 %). Окрім цього, надрівноважене легування азотом дає можливість отримувати високоміцні сталі з необхідними коррозійно-механічними характеристиками. Зварювання високоазотних сталей проходить без особливих ускладнень. Проте коррозійно-механічні характеристики таких зварних з'єднань вивчені недостатньо.

Досліджували експлуатаційні характеристики зварних з'єднань зразків промислової сталі 12Х18АГ18Ш. За присадковий матеріал обрано композицію з вмістом азоту 0,38 % та високим вмістом хрому, що поліпшує розчинність азоту в металі шва, підвищує його корозійну стійкість, а також зварювальний дріт Св-01Х19Н9, рекомендований ГОСТ 2246-70 для зварювання високохромистих сталей. Оцінку зварних з'єднань виконано відповідно до European Standard EN 288-3, що включає металографічний аналіз, випробування на розтяг, згин, ударну в'язкість та неруйнівний контроль (візуальний та ультразвуковий). Досліджували зразки перерізом 12Х25 мм із стиковим зварним з'єднанням та Х-подібним розробленням країв (ГОСТ 5264-69). Шви виконано аргоно-дуговим зварюванням. Для оцінки корозійної стійкості зварних з'єднань зняті потенціодинамічні поляризаційні криві матеріалу шва та основного матеріалу в 22 %-х розчинах NaCl та CuCl<sub>2</sub>.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПРОЦЕДУР ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ.** А. В. Баранов, Л. В. Ильин, В. П. Леонов (ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, РФ). Применяемые в настоящее время методики расчета циклической прочности сварных соединений и узлов буровых платформ имеют некоторые недостаточно разработанные положения, в ряде случаев существенно снижающие точность расчетных оценок. К их числу относятся неопределенность процедуры установления соответствия сварного соединения реальной конструкции той или иной категории по уровню циклической прочности в случае, если его геометрия и вид нагружения отличны от базового образца, использованного при построении S-N кривой; излишний консерватизм оценок долговечности, обусловленный предположением о предельно высоком уровне сварочных остаточных напряжений (ОН) для всех соединений и игнорированием «остаточного ресурса», соответствующего стадии роста трещины; отсутствие методологии учета эффекта от применения дополнительных технологических мероприятий, повышающих циклическую прочность (аргоно-дуговое оплавление, механическая обработка, поверхностное пластическое деформирование). Поэтому дальнейшее совершенствование расчет-

**CORROSION-MECHANICAL STRENGTH OF WELDED JOINTS OF HIGH-NITROGEN STEELS.** O.I. Balitsky, O.O. Krokhmalny (H.V. Karpenko Phys.-Mech. Inst., Lviv, Ukraine), I.F. Kostyuk (DAEK Zakhidenergo, Lviv, Ukraine). High-nitrogen austenitic steels are characterised by unique strength properties. A high level of strengthening by cold deformation (up to 3000 MPa) is achieved due to a high content of nitrogen (up to 1 %). In addition, superequilibrium alloying with nitrogen allows production of high-strength steels with the required corrosion-mechanical properties.

Welding of high-nitrogen steels does not make any particular difficulties. However, the corrosion-mechanical properties of such welded joints have not been studied well enough.

Performance of welded joints of samples of commercial 12Kh18AG18Sh steel has been studied. A composition with 0.38 % nitrogen and a high content of chromium which improves nitrogen solubility in the weld metal and its corrosion resistance, as well as Sv-01Kh19N9 welding wire recommended by GOST 2246-70 for welding high-chromium steels were selected as filler material. Welded joints were evaluated according to European Standard EN 288-3 which includes metallographic analysis, tensile, bend and impact testing and non-destructive testing (visual and ultrasonic). Samples of 12X25 mm cross-section with a butt welded joint and X-shaped edge preparation (GOST 5264-69) were studied. The welds were made by argon-arc welding. Potentiodynamic polarisation curves of the weld material and the base metal were measured in 22 % NaCl and CuCl<sub>2</sub> solutions to evaluate the corrosion resistance of welded joints.

**IMPROVEMENT OF CALCULATION PROCEDURES FOR EVALUATING THE LIFE OF WELDED JOINTS OF STRUCTURES OF DRILLING PLATFORMS USING SIMULATION OF PROCESSES OF CYCLIC FRACTURE.**

A.V. Baranov, A.V. Ilyin, V.P. Leonov (TsNII KM, St. Petersburg, Russia). The currently applied procedures of analysis of cyclic strength of welded joints and connections of drilling platforms have certain underdeveloped postulates, which in a number of cases essentially lower the accuracy of the estimates. Some of them are the ambiguity of the procedure of determination of the correspondence of a welded joint in an actual structure to a particular category by the cyclic strength level in the case, if its geometry and loading mode differ from the basic sample used in plotting the S-N curve; overconservative estimates of fatigue life arising from the assumption of the limit high level of the residual welding stresses (RWS) for all the joints and neglecting the "residual life" corresponding to the crack propagation stage; lack of a methodology of allowing for the effect of application of additional technological measures improving the cyclic strength (argon-arc surface melting, mechanical treatment, surface plastic deformation). Therefore, further improvement of calculation methods used in the procedures is urgent. Not only an increase of the scope of experimental data, but also theoretical substantiation of the required corrections, as well as introduction of correction factors appear to be quite important, this being due to the complexity of transition

ных схем, используемых в методиках, является актуальным. Представляется весьма важным не только увеличение объема экспериментальных данных, но и теоретическое обоснование необходимых корректировок, а также введение поправочных коэффициентов, поскольку это вызвано сложностью перехода от результатов испытаний образца к прогнозированию ресурса фрагмента реальной конструкции. Цель работы заключается в решении круга вопросов, связанных с таким переходом, на базе физических моделей циклического разрушения и результатов исследования напряженно-деформированного состояния сварных соединений.

Результаты исследований методом конечных элементов (МКЭ) напряженного состояния сварных соединений и коэффициентов концентрации напряжений позволили предложить метод определения параметра макрогеометрии сварного соединения  $A$  [мм<sup>1/2</sup>], характеризующего уровень локальных деформаций для любого соединения при данном технологическом процессе сварки. Введение этого параметра позволяет избежать недостатков процедуры определения «Hot Spot Stress», поскольку не требует искусственного подразделения эффектов концентрации на «связанные с конструкцией узла» и «связанные с наличием сварного шва». Анализ результатов решения термодеформационных задач МКЭ, моделирующих возникновение ОН при наложении сварного шва, дает основания для подразделения сварных соединений натуральных конструкций на три группы — с низким уровнем ОН, с уровнем ОН, близким к пределу текучести, а также соединений, при сварке которых возникают далекодействующие поля реактивных сварочных напряжений.

Разработана расчетная модель циклического повреждения, учитывающая особенности его развития на начальной стадии в зоне острых концентраторов. Ее реализация в виде компьютерной программы позволяет получать расчетные кривые допускаемых циклических напряжений по выбранному предельному состоянию соединения. Входными параметрами при расчете являются величина  $A$ , характеристики распределения радиуса концентратора как случайной величины для конкретной технологии и способа сварки, ожидаемый уровень ОН. Основным результатом численного моделирования — установление соответствия между параметром макрогеометрии и эффективным коэффициентом концентрации напряжений сварного узла или соединения для данного технологического процесса сварки. На базе этих результатов может быть сформулирована процедура определения категории рассматриваемого сварного соединения по циклической прочности, учитывающая тип соединения, размеры и конфигурацию свариваемых элементов, наличие дополнительных технологических обработок шва.

**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ.** В. А. Бондаренко, Г. Е. Филатов (Гос. ун-т, г. Оренбург, РФ). Ряд деталей машиностроения имеет малый допуск на изгиб оси. При необходимости восстановления способом электродуговой наплавки некоторых поверхностей цилиндрических деталей из-за их глубокого и неравномерного износа возни-

from the sample testing results to forecasting the life of a fragment of the actual structure. The goal is resolving a number of issues connected with such a transition based on physical models of cyclic fracture and results of investigation of the stress-strain state of the welded joints.

The results of FEM analysis of welded joint stressed state and of the stress intensity factors allowed suggesting a method for determination of the welded joint macrogeometry parameter  $A$ , (mm<sup>1/2</sup>) which characterises the level of local deformations for any joint with the given welding technology. The introduction of this parameter permits avoiding the disadvantages of the procedure of Hot Spot Stress determination, as it does not require an artificial division of the concentration effects into those "related to the connection design" and those "related to the presence of the weld". Analysis of the results of solving by FEM the thermodeformational problems which simulate RWS development during the weld deposition, gives grounds to subdivide the welded joints of full-scale structures into three groups, namely those with a low level of RWS; with RWS level close to the yield point, as well as the joints welding of which leads to development of far-range fields of reactive welding stresses.

A calculation model of cyclic damage has been constructed allowing for the features of its development at the initial stage in the sharp stress raiser zone. Its implementation in the form of a computer program permits derivation of calculated curves of admissible cyclic stresses from the selected limit state of the joints. The input parameters in calculation are  $A$  value, characteristics of distribution of concentrator radius as a random value for a specific technology and process of welding and the anticipated RWS level. The main result of numerical simulation is to establish a correlation between the macrogeometry parameter and effective stress intensity factor of the welded connection or joint for a particular welding technology. These results can be used to work out the procedure of determination of the category of the considered welded joint by cyclic strength, allowing for the joint type, dimensions and configuration of the elements being welded and additional treatments of the weld.

**CONTROL OF FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN ELECTRIC ARC SURFACING.** V.A. Bondarenko, G.E. Filatov (State Univ., Orenburg, Russia). A number of mechanical engineering parts have a small tolerance for axle bending. When it becomes necessary to restore by the electric arc surfacing process some surfaces of the cylindrical parts because of their deep and non-uniform wear, it is difficult to reduce residual deformations.

кают трудности с уменьшением остаточных деформаций.

Нами разработана технология управления формированием остаточных напряжений при восстановлении цилиндрических деталей способом электродуговой наплавки. Испытания проводили на модернизированной наплавочной установке У-653. Наплавляемую деталь погружали в виброкипящий слой (ультразвуковая установка УЗГ-4М, отклонение линии возмущающей силы от вертикального положения в сторону достигало +15°) до уровня 0,3 радиуса наплавляемой поверхности. Состав виброкипящего слоя следующий: смесь порошков ПГ-С27 (ПН-У140Х28М) — 10 мас. долей, % и ПГ-СР4 (ПН-ХН80С4Р4) — 18 мас. долей, %. Материал детали — сталь 15ХГН2ТА, ее диаметр под наплавку — 80 мм, длина наплавляемых участков — 86 мм, электродная проволока марки Нп70 диаметром 1,4 мм. В качестве защитной среды использовали активную парогазофлюсующую смесь (водяной пар при 400 °С + хлорид аммония). Сила тока составляла 150 А, напряжение — 28 В, частота вращения детали — 6 мин<sup>-1</sup>. Деталь погружали в виброкипящий слой таким образом, чтобы порошок приобретал способность перемещаться по наплавляемой поверхности против направления вращения. В результате было достигнуто улучшение качества наплавляемого металла. Колебания твердости наплавленного слоя за счет повышения равномерности охлаждения снизились до 4,4 % при твердости 55...60 HRC, изгиб оси составил 0,011...0,012 мм на длине 555 мм.

#### ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА НАПРУЖЕННЯМИ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ.

Я. І. Бурак, О. Р. Гачкевич, С. Ф. Будз, В. І. Асташкін, Є. М. Ірза (Ін-т приклад. пробл. механіки і математики ім. Я. С. Підстригача, м. Львів, Україна). У процесі зварювання елементів скляних конструкцій у зоні зварного шва виникають напруження, які можуть досягти значного рівня, перевищити припустимі норми і призвести, з одного боку, до руйнування конструкції, а з другого, — до формування залишкових напружень, що суттєво впливає на міцність конструкції. У зв'язку з цим проблема оптимізації за напруженнями режимів зварювання елементів скляних конструкцій є актуальною.

Пропонується математична модель оптимізації за напруженнями режимів зварювання елементів скляних конструкцій, побудована на основі механіко-математичної моделі термов'язкопружного тіла з урахуванням залишкових деформацій і напружень, які формуються в процесі зварювання.

Математичну модель поведінки скла побудовано виходячи з принципу адитивності, згідно з яким приріст компонентів тензора повної деформації має такий вигляд:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^t + d\epsilon_{ij}^c + d\epsilon_{ij}^{ost} + d\epsilon_{ij}^{str},$$

де  $d\epsilon_{ij}^e$ ;  $d\epsilon_{ij}^t$ ;  $d\epsilon_{ij}^c$ ;  $d\epsilon_{ij}^{ost}$ ;  $d\epsilon_{ij}^{str}$  — відповідно прирости тензора пружної деформації в діапазоні температур, нижчих за температуру склування; тензора термічної деформації; тензора деформації повзучості в діапазоні температур, вищих за температуру склування; тензора залишкової деформації, яка утворюється

We have developed a technology to control the formation of residual stresses in restoration of cylindrical parts by the electric arc surfacing process. Testing was conducted in an upgraded U-653 surfacing unit. The surfaced part was immersed into a vibroboiling layer (UZG-4M ultrasonic unit, lateral deviation of the disturbing force line from the vertical position was up to +15°) to the level of 0.3 of the processed surface radius. The composition of the vibroboiling layer was a mixture of 10 wt.% of PG-S27 (PN-U140Kh28M) and 18 wt.% of PG-CR4 (PN-KhN80S4R4) powders. The part material was 15KhGN2TA steel, its surfaced diameter being 80 mm, the length of the surfaced sections being 86 mm, and 1.4 mm electrode wire of Np70 grade was used. An active vapour-gas-fluxing mixture (water steam at 400 °C + ammonium chloride) was used as shielding atmosphere. Current was 150 A at 28 V voltage and the part rotation frequency was 6 min<sup>-1</sup>. The part was immersed into the vibroboiling layer so that the powder became capable of displacement over the surface being processed against the direction of rotation. This resulted in an improvement of the deposited metal quality. An increased uniformity of cooling led to reduction of the deposited layer hardness variation to 4.4 % at 55-60 HRC hardness, and axle bending was equal to 0.011-0.012 mm over 555 mm length.

#### OPTIMISING THE CONDITIONS OF WELDING THE GLASS STRUCTURE ELEMENTS IN TERMS OF STRESSES.

Ya.I.Burak, O.R.Gachkevich, S.F.Budz, V.I.Astashkin, E.M.Irza (Ya.S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, Lviv, Ukraine). During welding of the glass structure elements, the weld zone develops stresses which can reach a considerable level, exceed the admissible limits and lead to structure failure on the one hand, and to residual stresses formation, on the other hand, which has an essential influence on the structure strength. In this connection, the issue of optimisation of the conditions of welding the glass structure elements in terms of stresses, is urgent.

A mathematical model of optimisation of the conditions of welding the glass structure elements in terms of stresses is proposed. The model was based on a mechanical-mathematical model of a thermoplastic-elastic body, allowing for residual stresses and strains developing during welding.

The mathematical model of glass behaviour was constructed proceeding from the additivity principle, in keeping with which the increment of total deformation tensor components has the following form:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^t + d\epsilon_{ij}^c + d\epsilon_{ij}^{res} + d\epsilon_{ij}^{str},$$

where  $d\epsilon_{ij}^e$ ;  $d\epsilon_{ij}^t$ ;  $d\epsilon_{ij}^c$ ;  $d\epsilon_{ij}^{res}$ ;  $d\epsilon_{ij}^{str}$  are the increments of the elastic deformation tensor in the range of temperatures lower than the vitrification temperature; of thermal deformation tensor; of the tensor of creep flow in the range of temperatures higher than the vitrification temperature; of the tensor of residual deformation de-

при досягненні температури склування при охолодженні (гіпотеза «заморожування» Г. М. Бартенева); тензора структурної деформації.

При моделюванні враховуємо залежність теплофізичних характеристик скла від температури і приймаємо експериментально доведений факт про відсутність помітного впливу напружень на температуру скла.

Задача оптимізації за напруженнями режимів зварювання елементів скляних конструкцій складається з двох етапів: зварювання та охолодження зварного шва.

Функцією управління на етапі зварювання, коли температура навколошовної зони підвищується з початкової до температури зварювання, виступає густина теплового потоку, який підводиться до поверхні навколошовної зони, а на етапі охолодження зварного шва — температура навколишнього середовища. За критерій оптимальності на етапі зварювання обираємо мінімальний час нагрівання до температури зварювання, а на етапі охолодження — мінімум функціоналу, який характеризує відхилення тензора залишкових напружень від заданого рівня. При цьому мають виконуватися певні обмеження на функції управління та термонапружений стан навколошовної зони.

В такій постановці задача оптимізації за напруженнями режимів зварювання елементів скляних конструкцій є задачею на умовний екстремум деякого функціоналу.

Розв'язується ця задача шляхом використання методу зважених нев'язок у поєднанні з кінцево-елементною дискретизацією в часі та просторових змінних. У рамках запропонованого підходу отримуємо задачу на умовний екстремум функції, який визначається методами нелінійного програмування. Дану математичну модель і методику оптимізації теплових режимів зварювання проілюстровано на прикладах зварювання циліндричних оболонок і скляних напівсфер.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ.

Я. Бурак, Ю. Зозуляк, Ю. Ледяшов, В. Новацький (Ін-т приклад. проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача, м. Львів, Україна), В. Санченко (Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, м. Київ, Україна). Для виготовлення зварних конструкцій із підвищеними вимогами щодо забезпечення проектної форми і заданих параметрів міцності та надійності особливо важливою є можливість управління залишковими напруженнями та деформаціями. Таке управління має передбачати комплекс технологічних прийомів і методів на етапах підготовки до зварювання, безпосереднього зварювання та післязварювальної обробки. Запропоновано наукові основи комплексу узгоджених між собою заходів, які дозволяють забезпечити задані припустимі рівні залишкових напружень або їх максимальне зниження. Розглядаються найбільш дієві методи регулювання залишкових напружень: попереднє силове та температурне навантаження (до зварювання); супутній підігрів та раціональні схеми виконання зварного шва (в процесі зварювання); локальний відпал (після зварювання).

veloping when the vitrification temperature is reached in cooling (G.M. Bartenev's "freezing" hypothesis); and of structural deformation tensor, respectively.

Simulation allows for temperature dependence of thermal-physical characteristics of glass and takes into account the experimentally proven fact of the absence of any noticeable influence of stresses on the temperature of glass.

The problem of optimisation in terms of stresses of the conditions of welding the glass structure elements consists of two stages, namely making the weld and its cooling.

The control function at the welding stage when the HAZ temperature rises from the initial to the welding temperature, is the density of the heat flow which comes to the HAZ surface, and the environmental temperature at the weld cooling stage. The optimality criterion at the welding stage is the minimal time of heating to welding temperature, and at the cooling stage the minimum of the functional which characterises the residual stress tensor deviation from the specified level. In this case, certain limitations of the control function and the HAZ thermal stressed state should be in place.

In such a definition, the problem of optimisation the conditions of welding the glass structure elements in terms of stresses, is the problem of a conditional extremum of a certain functional.

This problem is solved using the method of weighed discrepancies in combination with finite-element sampling in time and spatial variables. In terms of the proposed approach we have a problem of a conditional extremum of a function which is determined by non-linear programming methods.

The given mathematical model and procedure of optimisation of the thermal conditions of welding are illustrated by examples of welding cylindrical shells and glass hemispheres.

#### FUNDAMENTALS OF OPTIMISING RESIDUAL STRESSES IN THE TECHNOLOGY OF WELDING THIN-WALLED ELEMENTS OF STRUCTURES.

Ya. Burak, Yu. Zozulyak, Yu. Ledyashov, V. Novatsky (Ya. S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, Lviv, Ukraine), V. Sanchenko (The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). The ability to control the residual stresses and strains is especially important in fabrication of welded structures of which more stringent requirements are made for provision of the design shape and specified strength and reliability parameters. Such control should envisage a package of process techniques and methods in the stages of preparation for welding, welding proper and post-weld heat treatment. Scientific fundamentals of a package of coordinated measures have been proposed, which permit ensuring the specified admissible levels of residual stresses or their maximal lowering. The most efficient methods of residual stress control are considered, namely prior force and temperature loading (before welding); concurrent heating and rational sequences of making the weld (during welding) and local annealing (after welding).

The mathematical model of integrated optimisation of residual stresses is based on a common energy approach.

В основу математичної моделі комплексної оптимізації залишкових напружень покладено єдиний енергетичний підхід. За вихідні критерії оптимальності прийнято функціонали енергії пружної деформації та середньоквадратичного відхилення залишкових напружень, що виникають в процесі зварювання, від заданих припустимих напружень. Таким чином, загальна задача формулюється як задача векторної оптимізації на кожному з етапів зварювального процесу. При цьому враховується як історія поетапного формування залишкових деформацій, що пов'язана з вибором схем зварювання, так і розподіл зовнішніх термосилових факторів. Реалізація розрахункової моделі ґрунтується на використанні підходів і методів багатокритеріальної оптимізації і динамічного програмування із застосуванням принципу оптимальності Белмана. У випадку протиріччя обраних критеріїв оптимальності пошук компромісно-оптимальних варіантів реалізується за підходом Парето. В роботі розглянуто основні типи зварних з'єднань (стикові, накладні, кутові) як для елементів конструкцій пластинчато-оболонкового типу, так і стержневих конструкцій. Вказано шляхи узагальнення запропонованого підходу для багатопрохідних зварних швів.

Запропонована методика є базовою при розробці бездеформаційної технології зварювання тонкостінних елементів конструкцій підвищеної якості.

#### ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБЧАТЫХ УЗЛОВ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКОЙ.

Э. Ф. Гарф, Э. М. Дыскин, А. Е. Литвиненко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). На основании выполненных ранее исследований сопротивления усталости сварных трубчатых узлов и влияния ультразвуковой ударной обработки (УУО) трубчатых узлов в зоне их сварных соединений на сопротивление усталости и долговечность показана возможность прогнозировать остаточный ресурс трубчатых конструкций после проведения УУО в процессе их эксплуатации, т. е. при наличии определенного уровня усталостного эксплуатационного повреждения, накопленного к моменту обработки. Получены результаты натурных испытаний трубчатых узлов, показывающие, что если в узлах, подвергшихся УУО в зоне сварного соединения, размах эффективных рабочих напряжений не достигает предела усталости, то зарождение усталостной трещины не зафиксировано.

Поскольку после УУО предел усталости существенно повышается, то относительно низкие уровни циклических напряжений в реальных конструкциях не участвуют в накоплении усталостного повреждения. Это обстоятельство является решающим при повышении долговечности трубчатых узлов в результате УУО, выполняемой в процессе эксплуатации конструкций.

На основе экспериментальных исследований разработана методика расчета на усталость трубчатых узлов.

Анализ рассеяния накопленных усталостных повреждений, соответствующих достижению предельного состояния сварных узловых соединений (появление макротрещины усталости), полученных при испытаниях на усталость, показывает, что их распределение соответствует нормальному закону с ма-

ach. The initial optimality criteria are taken to be the functionals of the elastic deformation energy and the mean root square deviation of residual stresses developing during welding, from the specified admissible stresses. Thus, the general problem is defined as the problem of vector optimisation in each of the welding process stages. In this case both the history of stage-by-stage formation of the residual strains, related to selection of the welding procedures, and the distribution of the external thermal-loading factors are taken into account. The calculation model is implemented through approaches and methods of multicriterial optimisation and dynamic programming using Bellman's principle of optimality. In the case of a contradiction between the selected optimality criteria, the compromise-optimal variants are sought in terms of the Pareto's approach. The main types of welded joints (butt, overlap and fillet) are considered in the paper, both for the elements of structures of plate-shell type and for rod structures. Methods are indicated for generalisation of the proposed approach for multipass welds.

The proposed procedure is the basic one in development of the technology of distortion-free welding of thin-walled structural elements of a higher quality.

#### ASSESSMENT OF FATIGUE LIFE OF TUBULAR CONNECTIONS AFTER ULTRASONIC PEENING TREATMENT.

E.F.Garf, E.M.Dyskin, A.E.Litvinenko (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). Earlier performed research of fatigue resistance of welded tubular connections and the influence of ultrasonic peening treatment (UPT) of tubular connections in the zone of their welded joints on fatigue resistance and life is used to demonstrate the ability to forecast the residual life of tubular structures after UPT performance during their operation, i.e. at a certain level of service fatigue damage accumulated by the moment of treatment.

Full-scale testing of tubular connections produced results which demonstrate that if in the connections subjected to UPT in the welded joint zone, the ranges of the effective working stresses do not reach the fatigue limit, no fatigue crack initiation is recorded.

As the fatigue limit becomes significantly higher after UPT, the relatively low levels of cyclic stresses in the actual structures do not contribute to fatigue damage accumulation. This is the decisive factor in improvement of the fatigue life of tubular connections as a result of UPT performed during the structure service.

A procedure of fatigue analysis of tubular connections has been developed proceeding from experimental studies.

Analysis of the scatter of accumulated fatigue damage which corresponds to achievement of the limiting state of welded connections (appearance of a fatigue macrocrack), derived in fatigue testing, shows that its distribution corresponds to the normal law with the mathematical expectation  $a = 1.064$  and sampling mean  $S = 0.128$ , which allowed the hypothesis of linear accumulation of fatigue damage to be used in development of the procedure of fatigue analysis of the connections.

The case of an off-shore platform connection is used to demonstrate the high effectiveness of welded joint

тематическим ожиданием  $a = 1,064$  и стандартным отклонением выборки  $S = 0,128$ , что позволило при разработке методики расчета узлов на усталость использовать гипотезу линейного накопления усталостного повреждения.

На примере узла морской стационарной платформы показана высокая эффективность обработки сварных соединений, которая при остаточном ресурсе эксплуатации в исходном после сварки состоянии, равном двум годам, позволяет продлить ресурс безопасной эксплуатации трубчатого узла до 12 лет.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ.

А. Я. Ищенко, Т. М. Лабура (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Представлены характеристики прочности и сопротивления разрушению сварных соединений перспективных алюминий-литиевых сплавов различных систем легирования (Al-Li-Mg, Al-Li-Cu, Al-Li-Cu-Mg). Установлены особенности изменения этих характеристик в зависимости от системы легирования и условий эксплуатации (температуры, скорости нагружения, наличия концентраторов напряжения). Показано, что минимальными показателями свойств во всех случаях отличается зона сплавления металла шва и основного металла. Рассмотрены варианты технологии сварки сплавов с литием, обеспечивающие повышение прочности и вязкости разрушения сварных соединений, снижение чувствительности к концентраторам напряжений и охрупчивания в условиях воздействия криогенных сред жидкого азота, кислорода, водорода. Для изготовления ответственных сварных узлов в различных конструкциях аэрокосмической техники рекомендуются сплавы марки 1420 при температурах эксплуатации от 293 до 77 К и марки 1460 — для более широкого интервала температур.

#### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СТАЛЬНЫХ БУНКЕРОВ.

М. И. Казакевич, Д. О. Банников (Гос. техн. ун-т ж. д. транспорта, г. Днепропетровск, Украина). Стальные пирамидально-призматические бункера являются одним из наименее изученных видов сварных листовых конструкций. Существующий упрощенный метод их расчета и проектирования, основанный на расчленении сооружения на отдельные простые элементы с последующим расчетом их по элементарным плоским расчетным схемам, не учитывает пространственную работу конструкций. В сочетании с некоторой условностью задания нагрузок это приводит к довольно неэкономичным решениям. С другой стороны, известные случаи, когда рассчитанные по всем правилам строительной механики бункера на практике начинали деформироваться и разрушаться.

Сам бункер состоит из призматической и пирамидальной частей. Конструктивно они сформированы из стальных листов небольшой толщины, подкрепленных приваренными к ним горизонтальными ребрами жесткости. Зачастую призматическая часть выполняется небольшой высоты и представляет собой простую обвязку из двутавровых балок. Протяженность сварных швов в бункерах весьма значительна и, как свидетельствует опыт эксплуатации, именно по ним происходит разрушение сооружений.

treatment which at the residual life equal to two years in the initial as-welded condition, allows the safe life of a tubular component to be extended up to 12 years.

#### CHARACTERISTICS OF STRENGTH AND FRACTURE RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF PROMISING ALUMINIUM-LITHIUM ALLOYS.

A. Ya. Ishchenko, T. M. Labura (The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). Strength and fracture resistance characteristics of promising aluminium-lithium alloys of various alloying systems (Al-Li-Mg, Al-Li-Cu, Al-Li-Cu-Mg) are given. The features of these characteristics variation depending on the alloying system and service conditions (temperature, loading rate, presence of stress raisers) are established. It is shown that in all the cases the minimal values of the properties are characteristic of the zone of fusion of the weld and the base metal. Variants of the technology of welding aluminium alloys with lithium are considered, which provide a higher strength and fracture toughness of welded joints, lower sensitivity to stress raisers or embrittlement when exposed to cryogenic media of liquid nitrogen, oxygen and hydrogen. Alloys of 1420 grade for service temperatures from 293 to 77 K and 1460 grade for a broader temperature range are recommended for fabrication of critical weldments in various structures of aerospace engineering.

#### UPGRADING OF DESIGNS OF STEEL HOPPERS.

M. I. Kazakevich, D. O. Bannikov (State Techn. Univ. of Railway Transportation, Dnepropetrovsk, Ukraine). Steel pyramidal-prismatic hoppers are one of the least studied kinds of welded sheet structures. The existing simplified approach to their calculation and design based on division of the construction into individual simple elements with their subsequent calculation by elementary plane design procedures, does not allow for the spatial performance of the structures. This, in combination with a certain arbitrariness of specifying the loads leads to rather costly solutions. On the other hand, known are the cases when the hoppers calculated in keeping with all the rules of structural mechanics, started deforming and breaking up in practice.

The hopper itself consists of a prismatic and a pyramidal part. In terms of design they are made of thin steel sheets reinforced with horizontal stiffeners welded to them. The prismatic part is quite often made of a small height and is a simple strapping of I-beams. The extent of welds in the hoppers is quite considerable, and, as indicated by the operation experience, this is exactly where the constructions fail.

Numerical simulation by the finite-element method was used for a detailed investigation and analysis of the spatial stress-strain state of the structures. Computation was performed using a specialised application program package.

Для подробного исследования и анализа пространственного напряженно-деформированного состояния конструкций было применено численное моделирование по методу конечных элементов. Расчеты выполняли на компьютере с применением специализированного пакета прикладных программ. Исследования проводили для восьми наиболее характерных объемов симметричных прямоугольных бункеров из диапазона  $5 \dots 1400 \text{ м}^3$ , которые охватывали все встречающиеся на практике размеры конструкций. В каждом из поддиапазонов были просчитаны бункера различных конструктивных схем и в первую очередь традиционной, с горизонтальным расположением ребер жесткости, сваренных в углах. Общая картина напряжения неплохо совпадает с практической, а концентраторами напряжений являются угловые зоны стыковки ребер и балок обвязки, некоторые места сварных соединений. Наряду с этим выявлено, что сама стенка и ребра в пролете сильно недогружены. Ориентация ребер жесткости перпендикулярно стенке без их сварки друг с другом существенно изменяет общее напряженно-деформированное состояние конструкции. Эпюра материала значительно приближается к эпюре напряжений. Удастся избежать многих местных концентраторов напряжений, возможно снижение массы ребер на 30...40 % без потери общей несущей способности. Положительным в совершенствовании конструктивной схемы является расположение ребер жесткости вертикально, точнее, веерообразно. При этом в работу включается сама стенка пирамидальной части, общая длина ребер, а значит, и протяженность сварных швов, уменьшается в 2,0-2,5 раза, надежность конструкции возрастает за счет максимального приближения к ее действительной работе. Дополнительными мерами по снижению металлоемкости бункера может служить применение разработанной улучшенной конструкции отдельных узлов, в частности узла опирания на колонну, узла стыковки призматической и пирамидальной частей и др.

Отдельно рассмотрен вопрос о соотношении жесткостей и высот пирамидальной и призматической частей. Предложена новая схема расчета балок обвязки с предположением о передаче нагрузки только через ее угловые зоны. Установлены разные градации оптимальных соотношений высот для различных объемов бункеров с учетом фактора экономичности заполнения сыпучим материалом. Всевозможные пространственные схемы распределения напряжений и деформаций наглядно иллюстрируют правильность наших выводов, являясь предпосылкой к разработке усовершенствованной теоретической методики расчета бункеров данного типа. Некоторые из предложенных рекомендаций, по мнению авторов, могут быть учтены в дальнейшем в нормативной литературе.

**РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБЧАТЫХ ПРОФИЛЕЙ.** В. С. Казарновский, Л. С. Васильева (СибГУПС (НИИЖТ), г.Новосибирск, РФ). Для экономичных сварных соединений элементов трубчатого профиля, стыковых и фланца с трубой, выполняемых без подкладного кольца с регулируемым внутренним кольцевым непроваром в пределах, допустимых нормами, проведен расчетный анализ значений и

Investigations were conducted for eight most typical volumes of symmetrical rectangular hoppers from 5 to 1400 m<sup>3</sup> range which covered all the practically used structure dimensions. In each of the subranges, the hoppers of various designs were calculated and, primarily, those of the traditional design with the horizontal arrangement of the stiffeners welded at corners. The total stress pattern correlates quite well with the practical results, while the stress raisers are corner zones of abutment of the stiffeners and the beams of the strapping and some zones of the welded joints. In addition it has been found that the wall proper and the stiffeners in the span are greatly underloaded. The stiffener orientation normal to the wall without their welding to each other, essentially changes the total stress-strain state of the structure. The material epure becomes much closer to the stress epure. Many of the local stress raisers can be eliminated, and the stiffener weight can be reduced by 30 to 40 % without loss of the total load-carrying capacity. A positive development in terms of improvement of the design, is vertical, or more precisely, fusiform arrangement of the stiffeners. In this case, the pyramidal part wall proper takes the load, the total length of the stiffeners and, hence extent of the welds, is reduced 2.0 to 2.5 times, and the structure reliability is improved due to reproducing its actual performance as close as possible. Application of the developed improved design of individual assemblies, namely the assembly of resting on the column, assembly of abutment of the prismatic and pyramidal parts, etc., can serve as an additional measure to lower the hopper metal content.

The issue of the ratio of the stiffness and height of the pyramidal and prismatic parts is considered separately. A new procedure of beam strapping calculation has been proposed with the assumption of the load transfer only through its corner zones. Various gradations of the optimal ratios of heights for different hopper volumes have been established allowing for the factor of cost-effectiveness of filling with the bulk material.

The most diverse spatial schematics of stress and strain distribution readily illustrate the correctness of our conclusions, being a prerequisite for development of an improved theoretical procedure for calculation of hoppers of this type. Some of the proposed recommendations, in the authors' opinion, can be incorporated further on into standards and specifications.

**CALCULATION ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES OF WELDED JOINTS OF TUBULAR SECTIONS.** V.S. Kazarnovsky, L.S. Vasiljeva (SibGUPS (NIIZhT), Novosibirsk, Russia). Calculation analysis of the values and nature of distribution of residual welding stresses (pipes of 89X5, 89X6 and 121X10 mm cross-section) has been performed for cost-effective welded joints of elements of a tubular profile, both butt joints and flange-to-pipe joints made without a backing ring with a con-

характера распределения остаточных сварочных напряжений (трубы сечением 89X5; 89X6 и 121X10 мм). Проанализировано совместное воздействие остаточных напряжений и внешней нагрузки (продольного растягивающего усилия).

Расчетный анализ осуществляли в конечно-элементном программном комплексе COSMOS/M. На первом этапе выявляли распределение температур по сечению образца. Задачу решали в предположении одновременного наложения сварного шва по всей длине (согласно предложению В. С. Игнатьевой). Это позволило принять распределение температур, температурных, а также остаточных напряжений, осесимметричным, что значительно упростило решение.

Распределение температуры при сварке определяется при граничных условиях третьего рода. Теплофизические характеристики принимали следующими: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 40,2 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ ; удельная объемная теплопроводность  $C = 600 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплоотдачи равнялся коэффициенту конвективной теплоотдачи и зависел от разности температур поверхности трубы и окружающей среды  $K = 0...19,8 \text{ Вт/м}^2^\circ\text{C}$ ; коэффициент объемного расширения постоянный  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ . Не учитывали эффекты структурных превращений, которые в низкоуглеродистых сталях не приводят к ощутимым погрешностям. Начальное распределение температур принимали однородным ( $+20^\circ\text{C}$ ). Погонная энергия сварки  $q_p = W/v$ , где  $v$  — скорость сварки (м/с), определялась в зависимости от толщины свариваемых труб (в пределах 10...20 кДж/см). Продолжительность подвода погонной энергии сварки назначали из условия разогрева металла шва до  $T = 1550^\circ\text{C}$ . Напряженное состояние (НС) определяли путем прослеживания развития упругопластических деформаций в процессе нагрева и выравнивания температур с применением аппарата теории термопластичности в форме метода деформационной теории пластичности. Характеристики металла  $E$ ,  $G$ , предел текучести  $\sigma_T$  и диаграмма деформирования  $\sigma_i - \epsilon_i$  приняты зависимыми от температуры.

Результаты расчета качественно совпали с картиной распределения остаточных напряжений, полученной в исследованиях ИЭС им. Е. О. Патона. В зоне сварного кольцевого шва стыковых соединений образуется объемное НС с довольно высоким уровнем кольцевых (тангенциальных)  $\sigma_z$ , осевых (продольных)  $\sigma_y$  и радиальных  $\sigma_x$  нормальных напряжений. На распределение остаточных напряжений значительное влияние оказывают изгибные деформации (так называемый корсетный эффект). Эти деформации появляются вследствие усадки активной зоны, приводящей к уменьшению диаметра участка трубы.

На внутренней поверхности сварного шва возникает объемное НС со значительными растягивающими остаточными  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$  и радиальными растягивающими напряжениями  $\sigma_x$ . Уровень последних в 2...3 раза ниже, чем  $\sigma_z$  и  $\sigma_y$ . Поля остаточных напряжений в зоне внутреннего несплошного сварного шва свидетельствуют о том, что они создают такую же концентрацию напряжений, как и нормальные напряжения от внешней (осевой) нагрузки. Следовательно, под-

контролируемый внутренний circumferential lack-of-penetration within the tolerance allowed by the codes. The combined action of residual stresses and external load (longitudinal tensile force) has been analysed.

Calculation analysis was performed in FEM COSMOS/M program system. Temperature distribution over the sample cross-section was determined in the first stage. The problem was solved in the assumption of a simultaneous deposition of the weld along the entire length (as suggested by V.S. Ignatyeva). This allowed the assumption of axially symmetric distribution of temperatures, and of temperature and residual stresses, which greatly simplified the solution.

Temperature distribution in welding is determined under boundary conditions of the third kind. The thermal-physical characteristics were taken to be as follows: heat conductivity factor  $\lambda = 40,2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ; bulk heat conductivity  $C = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ; coefficient of heat transfer was equal to the coefficient of convective heat transfer and was dependent on the temperature difference between the pipe surface and the environment  $K = 0...19,8 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ ; coefficient of volumetric expansion was constant  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ . The effects of structural transformations which do not lead to tangible errors in low-carbon steels, were not taken into account. The initial temperature distribution was assumed to be uniform ( $+20^\circ\text{C}$ ).

The welding heat input  $q_p = W/v$ , where  $v$  is the welding speed (m/s), was determined, depending on the thickness of the pipes being welded (in the range of 10 to 20 kJ/cm). The duration of welding heat input was assigned from the condition of weld metal heating up to  $T = 1550^\circ\text{C}$ . The stressed state (SS) was determined by tracing the development of elasto-plastic deformations during heating and homogenising of temperatures by applying the body of mathematics of the theory of thermoplasticity in the form of the method of deformational theory of plasticity. Metal properties  $E$ ,  $G$ , yield point  $\sigma_y$  and deformation diagram  $\sigma_i - \epsilon_i$  were taken to be temperature-dependent.

The calculation results qualitatively coincided with the pattern of residual stress distribution derived in the E.O. Paton Electric Welding Institute investigations. The zone of the circumferential weld of butt joints develops a bulk SS with a rather high level of circumferential (tangential)  $\sigma_z$ , axial (longitudinal)  $\sigma_y$  and radial  $\sigma_x$  normal stresses. The residual stress distribution is greatly affected by bending strains (so-called "corset" effect). These strains result from shrinkage of the active zone, leading to reduction of the pipe section diameter. The weld inner surface develops a bulk SS with considerable tensile residual  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$ , and radial tensile  $\sigma_x$  stresses. The level of the latter is 2 to 3 times lower than that of  $\sigma_z$  and  $\sigma_y$ . The residual stress fields in the zone of the weld inner lack-of-penetration indicate that they create the same stress concentration, as normal stresses due to external (axial) load. Therefore, the hypothesis put forward by I.V. Kudryavtsev, of the analogy between the residual stress concentration and concentration of stresses from the external forces, is confirmed.

Calculation analysis of the simultaneous impact of the residual welding stresses and the external load was performed using the equations of thermoplasticity and plasticity in the form of the plastic flow method, which allows taking into account the complex loading process. The

тверждается выдвинутая И. В. Кудрявцевым гипотеза об аналогии концентрации остаточных напряжений и концентрации напряжений от внешних сил. При расчетном анализе совместного воздействия остаточных сварочных напряжений и внешней нагрузки использованы уравнения термопластичности и пластичности в форме метода пластического течения, которая позволяет учесть процесс сложного нагружения. Уровень силового воздействия принят из условия достижения номинальными напряжениями предела текучести материала. При совместном сварочном и силовом воздействии происходит перераспределение составляющих напряженного состояния. Силовое воздействие несколько снижает жесткость НС в зоне концентратора от температурного воздействия в связи с тем, что направление вектора полных остаточных напряжений  $\sigma_{ij}^{ост}$  в зоне концентратора не совпадает с направлением вектора полных напряжений  $\sigma_{ij}^p$  от внешней осевой нагрузки  $p$ . В связи с этим алгебраическое суммирование остаточных и силовых напряжений, вычисленных раздельно, неправомерно. У соединений фланцев с трубой остаточные напряжения несколько ниже, чем у стыковых, из-за большей продолжительности разогрева металла, что по своему эффекту равнозначно предварительному разогреву свариваемых элементов.

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАПЛАВЛЯЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ.** В. Н. Калянов, В. А. Багров (Укр. инж.-пед. акад., г. Харьков, Украина). Повышение надежности и долговечности сварных и наплавленных деталей и узлов с использованием ресурсосберегающих материалов и технологий является актуальным. К наплавляемым сплавам предъявляются жесткие требования по технологической свариваемости, износостойкости и надежности. Применение мартенситно-старееющих сталей в качестве наплавленного износостойкого металла имеет ряд преимуществ перед металлом мартенситного и мартенситно-аустенитного классов. Однако высокая стоимость и дефицитность таких легирующих элементов, как кобальт, никель, вольфрам, ограничивают их применение. Перспективными являются безникелевые дисперсионно-твердеющие сплавы системы С-Сr-Mn-Mo-Ti на основе железа. Применение TiC в качестве основного карбидообразующего в этих сплавах изменяет структуру первичной кристаллизации, повышает износ- и термостойкость наплавленных слоев, уменьшает долю аустенита, что обусловлено снижением содержания углерода в твердом растворе. Так, наплавочные сплавы системы С-Сr-W-V-Ti, содержащие 0,65...0,70 % С (например марки 70X6B3ФТ), и С-Сr-Mn-Mo-Ti с 0,40...0,60 % С, 3...5 % Cr, 5...7 % Mo, 10...15 % Mn и 1,2...2,5 % Ti незначительно уступают твердости эталона 35V9X3ГСФ при температуре более 673 К. Важной характеристикой надежности наплавленных сплавов в процессе эксплуатации является размерная стабильность и стойкость против образования холодных трещин, которые могут вызываться напряжениями первого, второго и третьего рода. Изучение термических циклов, структурный и химический анализы показали, что применение наплавки с

level of load was assumed from the condition of nominal stresses achieving the material yield point. Simultaneous welding and load impact leads to redistribution of the stressed state components. The load action somewhat lowers the stiffness of SS in the zone of the raiser due to the temperature impact, as the direction of the vector of total residual stresses  $\sigma_{ij}^{res}$  in the raiser zone does not coincide with the direction of the vector of total stresses  $\sigma_{ij}^p$  from the external axial load  $p$ . In this connection, algebraic summation of the residual and load stresses calculated separately, is invalid. In pipe-to-flange joints, the residual stresses are somewhat lower than in the butt joints, because of a longer duration of metal heating, this being equivalent in its effect to preheating of the elements being welded.

**INCREASE IN RELIABILITY AND FATIGUE LIFE OF AS-SURFACED PRODUCTS.** V.N. Kallanov, V.A. Bagrov (Ukrainian Engineering-Pedagogical Academy, Kharkov, Ukraine). Increase in reliability and fatigue life of welded and surfaced parts using resources-saving materials and technologies is an urgent task. Stringent requirements on technological weldability, wear resistance and reliability are made of the surfacing alloys. Use of maraging steels as the deposited wear-resistant metal has several advantages over the metal of martensitic and martensitic-austenitic classes. Their application, however, is limited by the high cost and scarce supply of such alloying elements as cobalt, nickel and tungsten. Nickel-free dispersion-hardening iron-base alloys of C-Cr-Mn-Mo-Ti system are promising. TiC used as the main carbide-forming element in these alloys changes the initial crystallisation structure, increases the wear resistance and heat resistance of the deposited layers, reduces the share of austenite which is due to lowering of the carbon content in the solid solution. So, surfacing alloys of C-Cr-W-V-Ti system with 0.65-0.70 % C (for instance, of 70Kh6VZFT grade) and C-Cr-Mn-Mo-Ti system with 0.40-0.60 % C, 3-5 % Cr, 5-7 % Mo, 10-15 % Mn and 1.2-2.5 % Ti are only slightly inferior in hardness to 35V9KhZGSF standard at more than 673 K temperature.

An important characteristic of the deposited alloys reliability in service is the dimensional stability and cold cracking which may be caused by stresses of the first, second and third kind. Study of the thermal cycles, structural and chemical analyses showed that application of surfacing with feeding of filler without current directly into the molten metal pool, equalises the phase composition and microhardness distribution and lowers carbon diffusion into the fusion zone from the base metal.

The stress cracking resistance of the deposited maraging metal is also attributable to its high fracture toughness.

подачей обесточенной присадки непосредственно в ванну жидкого металла выравнивает фазовый состав и распределение микротвердости, снижает диффузию углерода в зону сплавления из основного металла.

Стойкость наплавленного мартенситно-старееющего металла к развитию трещин от концентрации напряжений объясняется также высокой вязкостью разрушения в сравнении с бейнитными и мартенситными сплавами. Исследование сплава марки 10X6H8M7C показало, что предел его трещиностойкости значительно превышает этот показатель инструментальных сталей марок 5XHM и 5XB2C. Наплавка сплавом марки 10X6H8M7C без предварительного подогрева разделительных штампов из сталей марок 5XHM и 5XB2C показала, что развитие остаточных напряжений сжатия предотвращает образование холодных трещин. Твердость, временное сопротивление, относительное удлинение наплавленного металла (старение 823 K; 2,5 ч) сохранились постоянными в интервале значений погонной энергии 3...15 кДж/см.

Таким образом, применение дуговой наплавки с использованием обесточенной присадки мартенситно-старееющими сплавами позволяет значительно повысить долговечность и надежность наплавляемых деталей, снизить при этом удельные расходы наплавочных материалов и электроэнергии, затраты на обработку наплавляемых деталей и узлов.

**АРГОНО-ДУГОВА ОБРОБКА БЕЗ ПІДПЛАВЛЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СХИЛЬНИХ ДО ЗАГАРТУВАННЯ СТАЛЕЙ.** В. М. Кулик, М. М. Савицький, Д. П. Новікова, В. Г. Васильєв, Г. М. Гордань (Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, м. Київ, Україна). Для поліпшення характеристик пластичності та підвищення тріщиностійкості зварних з'єднань сталей, що загартовуються, виконують післязварювальні відпуски зварних виробів. Це потребує значних додаткових витрат енергії, а також не завжди можливе, особливо для великогабаритних конструкцій.

Запропоновано принципову технологію місцевої дугової обробки зварних з'єднань без підплавлення. Для цього вивчено термічні цикли обробки з різними швидкостями, виконано металогіфічні, дилатометричні, фрактографічні дослідження та механічні випробування зварних з'єднань сталі марки 30ХГСА товщиною 3 мм. Встановлено, що при збільшенні швидкості обробки  $v_{обр}$  знижуються значення температури нагрівання з'єднань, зростає різниця між їх лицевим та зворотним боком, підвищується швидкість охолодження, що викликає загартування. Для забезпечення необхідної температури нагрівання при збільшенні швидкості обробки слід підвищувати струм; при цьому погонна енергія, а відповідно, і витрати електроенергії, зменшуються.

При дуговому нагріванні зварного з'єднання до значень температури аустенізації в загартованому під час зварювання металі з Б-М структурою відбуваються такі перетворення:

- повторне загартування металу по всій товщині з утворенням структури типу початкової при  $v_{обр} = 4,5...6,0$  м/год;
- повторне загартування у верхній та неповне загартування металу в нижній частинах з'єднання при  $v_{обр} = 12...16$  м/год;
- повторне загартування в шарах металу, що прилягають до лицевої поверхні, та відпуск у решти

hness, compared to bainite and martensite alloys. Study of 10Kh6N8M7S grade alloy revealed that its cracking resistance limit is much higher than this value for tool steels of 5KhNM and 5KhV2S grades. Surfacing of shearing dies of 5KhNM and 5KhV2S grade steels with 10Kh6N8M7S grade alloy, without preheating demonstrated that development of residual compressive stresses prevents cold cracking. The hardness, ultimate strength, relative elongation of the deposited metal (ageing at 823 K, 2.5 h) remained constant in the range of heat input values of 3–15 kJ/cm.

Thus, application of arc surfacing with maraging alloys using a filler without current permits an essential improvement of the fatigue life and reliability of the surfaced parts, while lowering the specific consumption of surfacing consumables and power, as well as the cost of treatment of the surfaced parts and components.

#### ARGON-ARC TREATMENT WITHOUT PARTIAL MELTING OF WELDED JOINTS MADE OF QUENCHING STEELS.

V.M.Kulik, M.M.Savitsky, D.P.Novikova, V.G.Vasilyev, G.M.Gordan (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). Post-weld tempering of weldments is performed to improve the ductility properties and crack resistance of welded joints of quenching steels. This requires considerable additional energy consumption, and, besides, is not always possible, especially for large-sized structures.

A basic technology of local arc treatment of welded joints without partial melting has been proposed. For this purpose the thermal cycles of treatment at different speeds have been studied, metallographic, dilatometric, fractographic studies and mechanical testing of welded joints of 30KhGSA steel 3 mm thick have been performed. It is found that an increase in the treatment speed  $v_t$  results in lowering of the joint heating temperature, greater difference between their face and reverse side, increase in their cooling rate, this leading to quenching. In order to achieve the required temperature of heating with the increase of the treatment speed, it is necessary to increase the current; the heat input and the power consumption, respectively, are reduced in this case.

In arc heating of a welded joint up to the values of austenitization temperature, the following transformations proceed in the metal with a bainite-martensite structure quenched during welding:

- repeated quenching of the metal across the entire thickness with formation of the structure of the type of the initial structure at  $v_t = 4.5-6.0$  m/h;
- repeated quenching in the upper and incomplete quenching of the metal in the lower parts of the joint at  $v_t = 12-16$  m/h;
- repeated quenching in the metal layers adjacent to the face surface and tempering of the rest of the joint at  $v_t = 37$  m/h. Metal quenching without partial melting at 80 m/h and higher treatment speed is difficult, which

з'єднання при  $v_{обр} = 37$  м/год. Загартування металу без підплавлення при швидкості обробки 80 м/год та вище утруднене, що зумовлює здійснення переважно короточасного відпуску.

При повторному загартуванні досягають подрібнення мікроструктури, зменшення розміру аустенітного зерна, збільшення кількості пластичних бейніту та залишкового аустеніту в металі з Б-М структурою. Завдяки цьому, а також короточасному відпуску знижується твердість металу з'єднання, підвищується ударна в'язкість, поліпшується характер руйнування, знижується чутливість до концентраторів напружень. Позитивний ефект обробок зростає при збільшенні їх кратності.

Нова технологія післязварювальної місцевої обробки не потребує спеціалізованого обладнання, виконується на тому ж обладнанні, що і зварювання, не ускладнює технологічний процес виробництва зварних конструкцій. Місцева дугова обробка — на порядок менш енерговитратна за пічну.

**ВЛИЯНИЕ НЕИЗБЕЖНЫХ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.** Т. М. Лабур, А. Я. Ищенко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Исследовано влияние несплошностей в виде единичных внутренних дефектов в сварных соединениях высокопрочных алюминиевых сплавов марок 1420 и 1460. Установлен характер изменения механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) и сопротивления разрушению ( $\sigma_r$ , УРРТ) в зависимости от наличия и относительных размеров таких дефектов, как поры или включения оксидной пленки. Показано, что единичная пора, сокращающая площадь сечения образца не более чем на 5 %, не оказывает существенного влияния на временное сопротивление  $\sigma_b$  и номинальное разрушающее напряжение  $\sigma_r$ . Показатели пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и вязкости (УРРТ) при этом уменьшаются на 10...15 % по сравнению со сварными соединениями без дефектов. Наличие включений оксидной пленки при тех же относительных размерах, что и поры, более заметно снижает показатели механических характеристик швов, особенно сопротивления разрушению. Увеличение размера указанных дефектов до 8 % от площади сечения образцов приводит к снижению прочности и номинального разрушающего напряжения на 15...20 % в случае поры и на 30...50 % при наличии включений оксидной пленки. Пластичность и вязкость уменьшаются в 1,5 или 2,0 раза в зависимости от типа дефекта (поры или оксидные включения). Результаты исследования показали, что при установлении допустимого уровня дефектов в реальных сварных соединениях необходимо учитывать не только их количество и относительную протяженность, но и тип.

**ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ К ВОПРОСАМ СВАРКИ.** Э. В. Лазарсон (Гос. техн. ун-т г. Пермь, РФ). Использование нового научного направления — теории нечетких множеств (ТНМ) — имеет большие перспективы. Данная теория позволяет формально описывать объекты и явления, которые настолько сложны или некорректно определены, что не поддаются описанию в общепринятых количественных терминах. Опыт кафедры СП Перм-

results in performance of predominantly a short-time tempering.

Microstructure refinement, reduction of the austenite grain size, increase of the amount of ductile bainite and residual austenite in the metal with bainite-martensite structure are achieved in repeated quenching. This, as well as short-time tempering, results in a lower hardness of the joint metal, higher impact toughness, more favorable fracture mode, and lower sensitivity to stress raisers. The positive effect of treatments increases with their number.

The new technology of post-weld local treatment does not require any specialised equipment, is performed in the same equipment as welding, and does not make the technology of this structure fabrication any more complex. The local arc treatment involves an order of magnitude smaller power consumption, than furnace treatment.

**EFFECT OF INEVITABLE INNER DEFECTS ON THE FRACTURE RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH ALUMINIUM ALLOY WELDED JOINTS.** T. M. Labur, A. Ya. Ishchenko (The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). The influence of discontinuities in the form of individual inner defects in welded joints of high-strength aluminium alloys of 1420 and 1460 grades was studied. The nature of the change of the mechanical properties ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) and fracture resistance ( $\sigma_r$ , SECP), depending on the presence and relative dimensions of such defects as pores or oxide film inclusions, was established. It is shown that a solitary pore reducing the sample cross-sectional area by not more than 5 %, does not make an essential influence on the ultimate strength ( $\sigma_b$ ) or nominal breaking stress ( $\sigma_r$ ). The values of ductility ( $\delta$ ,  $\psi$ ) and toughness (SECP) in this case are reduced by 10 to 15 % compared to the sound welded joints. The presence of oxide film inclusions of the same relative dimensions as those of the pores, more noticeably reduces the values of the mechanical characteristics of the welds, especially fracture resistance. Increase of the mentioned defect size up to 8 % of the sample cross-sectional areas, lowers the strength and the nominal breaking stress by 15 to 20 % in the case of a pore and by 30-50 % in the presence of oxide film inclusions. The ductility and toughness are reduced 1.5 to 2.0 times, depending on the defect type (pores or oxide inclusions). The investigation results showed that when the admissible level of defects in the actual welded joints is determined, it is necessary to take into account not only their number and relative length, but also the defect type.

**APPLICATION OF THE THEORY OF FUZZY SETS TO THE PROBLEMS OF WELDING.** E. V. Lazarsen (State Techn. Univ., Perm, Russia). Application of the new scientific field, namely fuzzy-set theory (FST) is highly promising. This theory permits a formal description of the objects and phenomena which are so complex or incorrectly defined that they do not lend themselves to description by the universally accepted quantitative terms. The experience of WP Chair of Perm STU permits regarding

ГТУ дает основание считать актуальными следующие области приложения ТНМ к вопросам сварки.

**Формализация знаний.** Знания в области теории и технологии сварки имеют преимущественно описательный характер. Например, в большинстве справочников по сварке основное место занимает текстовый материал. Общепринятыми у сварщиков являются понятия «высокая склонность к образованию трещин», «малая погонная энергия сварки», «тонкий металл» и т. п., отличающиеся количественной неопределенностью.

Для формализации подобных высказываний в ТНМ используются базовые понятия «лингвистическая переменная», «нечеткое множество» и производные от них — «нечеткая переменная», «нечеткое отношение», «терм-множество» и др. С помощью экспертных оценок нечеткие понятия и отношения естественного языка заменяются нечеткими подмножествами, которыми можно оперировать как некоторыми математическими объектами.

**Моделирование проектных задач и процессов сварки.** Сложность моделирования зачастую связана с неопределенностью и неточностью отношений между входными и выходными параметрами модели. Например, при выборе способа сварки одним из факторов является толщина свариваемого металла. Однако невозможно точно указать, для каких именно толщин можно применять тот или иной способ сварки. При построении моделей искусственное введение однозначности может приводить к четким, но неверным результатам.

Модели представления задач класса выбора решений часто строят на основе таблиц соответствий, в которых соответствия указываются с помощью значений булевой функции. Это порождает проблему неоднозначности решений, генерируемых моделью. Более эффективными являются таблицы соответствий со степенями принадлежности, задаваемыми с помощью функций принадлежности.

В целом нечеткие модели по сравнению с обычными отличаются большей информативностью, точностью и адекватностью.

**Разработка алгоритмов принятия решений.** При принятии решений необходима оптимизация одновременно по нескольким критериям. Ввиду сложности моделирования данной процедуры в автоматизированных системах она в основном возлагается на человека. Например, в САПР ТПС пользователь выбирает из меню способы сварки, сварочные материалы, оборудование и др., т. е. выбор фактически производится вручную.

С помощью нечетких алгоритмов, разрабатываемых по ТНМ, удается моделировать такие действия человека, которые в настоящее время относят к неформализуемым. Тем самым расширяются возможности автоматизации процедур принятия решений в сложных условиях моделирования и проектирования.

**Совершенствование автоматизированных систем.** В сварочном производстве из автоматизированных систем наибольшее распространение получили САПР ТПС сварки. К недостаткам таких систем можно отнести сравнительно низкий уровень автоматизации проектирования основных параметров технологии (в пределах 5...30 %) и низкую информативность баз данных.

Новые методы формализации знаний, построения

as urgent the following areas of FST application to welding problems:

**Knowledge formalisation.** Knowledge on welding theory and technology mostly is of a descriptive nature. For instance, in the majority of welding manuals, the main place is taken up by textual material. Such notions as "high susceptibility to cracking", "low heat input in welding", "thin metal", etc., characterised by quantitative indeterminacy, are universally recognised by welders. In TSF such phrases are formalised by basic concepts of a "linguistic variable", "fuzzy set" and their derivatives, namely "fuzzy variable", "fuzzy relation", "term set", etc. Expert evaluations are used to replace the vague notions and relations of the natural language by fuzzy subsets which can be manipulated as some mathematical objects.

**Simulation of design problems and welding processes.** The simulation complexity is often related to indeterminacy and inaccuracy of the relations of the input and output parameters of the model. For instance, the thickness of the metal to be welded is one of the factors in selection of a welding process. It is, however, impossible to precisely indicate for which thicknesses a particular welding process can be used. In model construction an artificial introduction of uniqueness can lead to definite but incorrect results.

Models representing problems of solution selection class are often constructed on the basis of the tables of correspondence in which the correspondence is indicated by Boolean function values. This gives rise to the problem of ambiguity of the solutions generated by the model. Correspondence tables with grades of membership, assigned through membership functions, are more effective.

On the whole, the fuzzy models are characterised by greater information content, accuracy and adequacy, compared to the regular ones.

**Development of the decision-making algorithms.** Decision taking requires optimisation by several criteria simultaneously. In view of the complexity of simulation of this procedure in automated systems, it is mostly delegated to man. For instance, in FST CAD the user selects from the menu the welding processes, welding consumables, equipment, etc., i.e. selection is practically performed manually.

Fuzzy algorithms developed by FST, permit simulation of such actions of man which are currently regarded to be unformalisable. This offers wider possibilities of automation of the decision taking procedures under the complicated conditions of simulation and design.

**Improvement of automated systems.** Among automated systems, welding technology CAD (WT CAD) systems became the most widely accepted in welding production. A comparatively low level of automation of the main technological parameters design (in the range of 5-30 %) and low information content of the data bases can be regarded as the disadvantages of such systems.

New methods of knowledge formalising, model and algorithm construction change the traditional principles of development of WT CAD systems and bring them under the category of intellectual systems.

For welding experts the most important are the applied aspects of FST. Their mastering is regarded to be an urgent task, as it permits increasing the effectiveness

моделей и алгоритмов меняют традиционные принципы разработки САПР ТПС, переводят их в разряд интеллектуальных систем.

Для специалистов-сварщиков наиболее важны прикладные аспекты ТНМ. Их освоение представляется актуальной задачей, поскольку позволяет повысить эффективность и уровень автоматизации исследовательских и проектных работ в области сварки.

#### ПРОКАТНО-СВАРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ТРАНСПОРТНЫХ И ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТАХ. В. К. Лебедев, Ю. Д. Яворский, П. А. Щепетинов (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Показаны шпунтовые элементы, которые могут использоваться для различных ограждений, берегоукрепляющих конструкций, шпунтовых стенок, уголкового стенок со свайными элементами, а также основаниями и др.

В большинстве случаев причальные сооружения представляют собой уникальные строительные, в том числе и металлические, конструкции, учитывающие частные грунтовые условия, волновые и ветровые нагрузки, нагрузки от навала судов и т. п.

Для оценки эффективности использования металла в подпорных стенках применен показатель утилизации материала  $W/g$ , где  $W$  — момент сопротивления 1 пог. м стенки, см<sup>3</sup>/пог.м;  $g$  — масса 1 м<sup>2</sup> шпунтовой стенки, кг. Рассмотрены различные конструкции шпунтовых элементов и их статические характеристики, включая замковые соединения, полученные на физических моделях методом масштабной деформации.

Приведены данные о применении прокатно-сварных шпунтов трубчатого профиля с моментами сопротивления 7...19 тыс. см<sup>3</sup> / 1 пог. м стенки, оснащенные защемляющимися замками, что позволяет сократить сроки строительства причалов в 1,5...2,0 раза по сравнению со шпунтами других видов за счет уменьшения трудозатрат, а во многих случаях почти в 2 раза повысить эффективность использования проката. Благодаря этому открывается возможность для увеличения объема строительства из одного и того же количества стали. Возведение конструкций из разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона прокатно-сварных элементов позволяет снизить удельную себестоимость строительства портовых гидротехнических сооружений. Это нашло практическое подтверждение при строительстве причалов в портах Темрюк и Ейск.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УПРУГОГО РАСТЯЖЕНИЯ СВАРНОЙ СТРИНГЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СПЛАВА АМg6NPP НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ. Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, Н. А. Пашин, В. В. Лысак (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Крупногабаритные тонкостенные сварные оболочки из алюминиевых сплавов находят широкое применение в аэрокосмической технике. Условия эксплуатации данных конструкций предъявляют высокие требования к точности их изготовления. Это требует разработки мероприятий по минимизации отклонений от заданных геометрических размеров изделий, вызванных укорочениями от сварки. В качестве объекта исследования выбрана тонкостенная оболочка из высокопрочного алюминия сплава марки АМg6NPP диаметром 3800 мм, высотой 2400 мм и толщиной стенки 5 мм. В процессе изго-

and level of automation of the research and design work in the field of welding.

#### ROLLED-WELDED ELEMENTS FOR WATER-ENGINEERING WORKS IN TRANSPORT AND INDUSTRIAL FACILITIES. V.K. Lebedev, Yu.D. Yavorsky, P.A. Shchepetinov (The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine).

Sheet piles are presented which can be used for various enclosures, bank consolidation structures, sheet piling bulwark walls, corner walls with pile elements, as well as foundations, etc.

In the majority of cases wharf constructions are unique building, in particular metal structures, allowing for specific soil conditions, wave and wind loads, loads from ship bulk, etc.

Material utilisation factor  $W/g$ , where  $W$  is the moment of resistance of one linear meter of the wall, cm<sup>3</sup>/linear m,  $g$  is the weight of 1 m<sup>2</sup> of the sheet piling, kg, was used to evaluate the effectiveness of metal utilisation in the supporting walls.

Various sheet pile designs and their static characteristics including clamp joints are considered, which were derived from physical models by the scale deformation method.

Data are given on application of rolled-welded sheet piles of a tubular profile with moments of resistance of 7...19000 cm<sup>3</sup> per 1 linear meter of the wall, fitted with pinch clamp joints, which allows the period of the wharf construction to be reduced 1.5 to 2.0 times compared to other kinds of sheet piles, due to reduction of labour expenditure, and in many cases increase the effectiveness of the rolled stock utilisation almost 2 times. This opens up the possibility of increasing the volume of construction from one and the same quantity of steel. Erection of structures from rolled-welded elements permitted reduction of the specific cost of construction of the port water works. This has been confirmed in practice in construction of wharves in Temryuk and Eysk ports.

#### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELASTIC PRE-TENSION OF A WELDED STRINGER SHELL OF AMg6NPP ALLOY ON ITS STRESSED-STRAINED STATE. L.M. Lobanov, V.I. Pavlovsky, N.A. Pashchin, V.V. Lysak (The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine).

Large-sized thin-walled welded shells of aluminium alloys are finding wide application in aerospace engineering. The service conditions of these structures make high requirements of the accuracy of their fabrication. This necessitates development of measures to minimise the deviations from the specified geometrical dimensions of the items, due to welding shrinkage. A thin-walled shell of a high-strength aluminium alloy of AMg6NPP grade of 3800 mm diameter, 2400 mm height with 5 mm wall thickness was selected as the object of investigations. During the structure fabrication 72 stiff-

товления конструкции к обечайке с внутренней стороны в продольном направлении электронным лучом приваривали 72 ребра жесткости (стрингеры) размерами 5X500X2400 мм также из сплава марки AMg6NPP. Расстояние между ребрами (шпация) задавали равным 170 мм. Режим сварки: ускоряющее напряжение 60 кВ, ток сварки 50 мА, ток фокусирующей 700 мА, скорость сварки 41 м/ч.

К стрингерным оболочкам предъявляют высокие требования по точности изготовления. Так, например, максимальный прогиб в зоне таврового соединения должен составлять не более 1,5 мм на погонный метр шва. Условия эксплуатации изделия диктуют необходимость разработки технологии его изготовления с учетом использования приемов снижения остаточного коробления как сварных соединений, так и оболочки в целом.

В качестве мероприятий по обеспечению заданной точности тонкостенных оболочек применяли концентрированные источники сварочного нагрева (электронный луч) в сочетании с предварительным упругим растяжением собираемых под сварку элементов.

Для реализации предварительного упругого растяжения элементов оболочки создан специализированный стенд, позволяющий производить сборку, предварительное растяжение и электронно-лучевую сварку крупногабаритных панельных и оболочечных конструкций из легких сплавов.

Исследовано влияние предварительного упругого растяжения на напряженно-деформированное состояние оребренной обечайки из высокопрочного алюминиевого сплава марки AMg6NPP в процессе ее изготовления способом электронно-лучевой сварки. Остаточные формоизменения обечайки определяли по изменению геометрических характеристик и жесткости конструкции в результате последовательной приварки стрингеров, по параметрам предварительного внецентрового растяжения участков поверхности конструкции, усадочных усилий от сварки, воспринимаемых переменной жесткостью оболочки при различных условиях опирания и нагружения. Обечайка при внецентровом растяжении имеет сложную форму, связанную с невозможностью конструкцией реализовать плоский изгиб и трансформацией его в деформацию «грибовидности».

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.** Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. И. Киянец, Е. М. Олейник (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Причиной многих аварий, происходящих при эксплуатации элементов машин и конструкций, бывают остаточные напряжения. В связи с этим актуальным является развитие эффективных методов получения полной информации о распределении и особенностях возникновения остаточных напряжений.

Для определения напряженно-деформированного состояния сварных конструкций предлагается использовать метод спекл-интерферометрии, позволяющий определять компоненты вектора перемещений  $u$ ,  $v$ ,  $w$  и измерять остаточные напряжения.

Интенсивное развитие компьютерной и вычислительной техники позволило существенно усовершенствовать спекл-методы и создать метод электронной

feners (stringers) of 5X500X2400 mm size, also of AMg6NPP grade alloy were welded to the shell by the electron beam from the inside in the longitudinal direction. The stiffener spacing was set to be equal to 170 mm. The welding mode was as follows: accelerating voltage of 60 kV, welding current of 50 mA, focusing current of 700 mA, welding speed of 41 m/h.

High requirements to the fabrication accuracy are made of stringer shells. So, for instance, the maximal sagging in the T-joint zone should not be more than 1.5 mm per a linear meter of weld.

The conditions of item service make it necessary to develop a technology of its fabrication incorporating the techniques to lower the residual distortion of both the welded joints and the shell as a whole.

Concentrated sources of welding heat (electron beam) in combination with elastic pretension of the elements assembled for welding, were used as the measures to ensure the specified accuracy of thin-walled shells.

In order to carry out the elastic pretension of the shell enables performance of assembly, pretension and electron beam welding of large-sized panel and shell structures of light alloys.

The influence of elastic pretension on the stress-strain state of a finned shell of a high-strength AMg6NPP aluminium alloy during its fabrication by electron beam welding was studied. The residual changes of the shell shape were determined by the change of the geometrical dimensions and rigidity of the structure as a result of a successive welding of stringers, by the parameters of off-center pretension of the sections of the structure surface. shrinkage forces due to welding applied to the variable rigidity of the shell under different conditions of bearing and loading. Under off-center tension the shell has a complex shape related to the impossibility of the structure to develop plane bending and its transformation into mushroom-shape deformation.

**DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN ELEMENTS OF MACHINE-BUILDING STRUCTURES USING THE METHOD OF ELECTRON SPECKLE-INTERFEROMETRY.** L. M. Lobanov, V. A. Pivtorak, V. I. Kiyaneets, E. M. Oleynik (The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). Residual stresses can be the cause for many accidents occurring in operation of machine and structure elements. In this connection development of effective methods of generation of complete information on the distribution and features of residual stresses formation is an urgent task.

In order to assess the stress-strain state of welded structures, it is proposed to use the speckle-interferometry method which permits determination of the components of the vector of displacements  $u$ ,  $v$ ,  $w$  and measurement of residual stresses.

Fast progress of computer systems and science enabled an essential improvement of the speckle methods and development of the speckle-interferometry met-

спекл-интерферометрии. К преимуществам последнего относятся высокая производительность, исключение «мокрого» химического или электростатического проявления и последующего восстановления картин интерференции.

С помощью разработанной методики определяли остаточные напряжения в сварном плоском элементе толщиной 70 мм из алюминиевого сплава, сваренного электронно-лучевым способом, а также в различных элементах сварных конструкций из алюминиевых сплавов. Представлены интерференционные картины полос, характеризующие уровни остаточных напряжений в исследуемых зонах конструкций и остаточных напряжений. Показаны перспективы применения нового электронного спекл-интерферометрического метода.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ОТВЕРСТИЙ В СОЧЕТАНИИ С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЕЙ.** Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко, С. Г. Андрущенко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. Г. Тульчинский, А. Г. Ковнеристов (Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова, г. Киев, Украина).

Разработана компьютерная система для определения остаточных напряжений по данным метода голографической интерферометрии. Для релаксации остаточных напряжений используют метод сверления несквозных отверстий диаметром 1,5...2,5 мм. Интерференционная картина полос, характеризующая поле перемещений вокруг высверленного отверстия, регистрируется с помощью компактной термопластической камеры мгновенной записи.

В экспериментах по определению остаточных напряжений использовали малогабаритные голографические приборы с оптической схемой, чувствительной к перемещениям из плоскости (нормальной компоненте вектора перемещений).

Интерференционная картина полос, полученная с помощью CCD-камеры и электронной платы оцифровки, вводится в память компьютера. Программное обеспечение, разработанное на языке программирования C++ в операционной системе Windows 3.1/95/98, позволяет отображать на дисплее компьютера развертку интенсивности и график зависимости порядков полос от текущей координаты, а также порядок полосы на кромке отверстия вдоль выбранного направления сканирования. Для связи нормальной составляющей вектора перемещений на кромке отверстия с напряжениями используются зависимости, полученные расчетным путем. Нормальная составляющая вектора перемещений на кромке отверстия определяется из порядка интерференционной полосы, затем вводятся данные о геометрических размерах высверливаемого отверстия и механических свойствах контролируемого материала. Компьютерная программа вычисляет остаточные напряжения в исследуемой точке. Процесс обработки интерференционных полос и вычисления остаточных напряжений занимает на компьютере РС 486DX2 около 3 мин.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ.** Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. Н. Чехов, К. А. Королев (Тавр. нац. ун-т им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Украина).

Решение, полученное Киршем для тонкой пластины с круговым отверстием при одноосном

ход. The latter has the advantages of a high efficiency, elimination of the wet chemical or electrostatic development and subsequent restoration of the interference patterns.

The developed procedure was used to determine the residual stresses in a flat welded element 70 mm thick of an aluminium alloy, welded by electron beam process, as well as in various elements of welded structures of aluminium alloys. The interference fringe patterns are given which characterise the levels of residual stresses in the studied structure zones. The prospects for application of the new electron speckle-interferometry method are discussed.

**COMPUTER SYSTEM FOR DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY THE METHOD OF HOLES IN COMBINATION WITH A HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY.** L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, P.D.Krotenko, S.G.Andrushchenko (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine), V.G.Tulchinsky, A.G.Kovneristov (V.M.Glushkov Institute of Cybernetics, Kiev, Ukraine).

A computer system has been developed for determination of residual stresses from the data of holographic interferometry method. Drilling of blind holes of 1.5 to 2.5 mm diameter is used for residual stress relaxation. The interference fringe pattern characterising the field of displacements around the drilled hole, is recorded by an instantaneous recording compact thermoplastic camera.

Small-sized holographic units with the optical circuit sensitive to out-of-plane displacements (normal component of the displacement vector) were used in the experiments on residual stress determination.

The interference fringe pattern produced with a CCD-camera and a digital board is entered into the computer memory. The software developed in C++ programming language in Windows 3.1/95/98 operational system allows displaying the intensity scan and the plot of the fringe order dependence on the current co-ordinate, as well as the order of the fringe at the hole edge along the selected scanning direction. Dependencies derived by calculation are used for correlating the normal component of the vector of displacements at the edge of a hole with stresses. The normal component of the vector of displacements at the hole edge is determined from the interference fringe order, and then the data on the geometrical dimensions of the drilled hole and mechanical properties of the material being controlled are entered. The computer program calculates the residual stresses in the studied point. Interference fringe processing and calculation of the residual stresses take about 3 min. in a PC 486DX computer.

**MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES USING THREE-DIMENSIONAL SOLUTIONS OF PROBLEMS OF THE THEORY OF ELASTICITY.** L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, P.D.Krotenko (The E.O.Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine), V.N.Chekhov, K.A.Korolyev (V.I.Vernadsky Tavrian Nat. Univ., Simferopol, Ukraine).

The solution derived by Kirsch for a thin plate with a circular hole at uniaxial tension, was the start of application of the met-

растяжении, положило начало использованию метода отверстий при определении остаточных напряжений. В последующем решение задачи Кирша использовали различные авторы в качестве основы для разработки методики определения остаточных напряжений. Для измерения деформаций применяли электротензометрию и другие экспериментальные методы. В случае использования несквозных отверстий исходят из трехмерного решения задачи теории упругости, которое находится одним из численных методов.

В настоящей работе предлагается использовать трехмерное аналитическое решение задач о напряженно-деформированном состоянии слоя со сквозным отверстием при двухосном однородном растяжении слоя, когда компонента напряжений  $\sigma_x$  линейно изменяется вдоль оси  $oy$ .

Для определения остаточных напряжений построена математическая модель, которая позволяет установить остаточные напряжения исходя из минимизации разницы между теоретическими и экспериментальными значениями перемещений в окрестности выверливаемого отверстия. Последние определяют методом голографической интерферометрии.

#### ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА. Л. И. Миходуй, В. Д. Позняков, О. Л. Миходуй (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Предварительный подогрев  $T_p$  — распространенная технологическая операция, практически всегда выполняемая при изготовлении сварных конструкций из высокопрочных бейнитомартенситных сталей с пределом текучести  $\geq 600$  МПа. Исследования влияния предварительного подогрева на формирование остаточных напряжений наиболее часто посвящены изучению особенностей конструкционных сталей, существенно различающихся между собой по химическому составу и условиям нагрева.

Задачей данных экспериментов был анализ способов достижения минимального уровня остаточных напряжений в сварных соединениях с учетом протекания тепловых процессов при конкретных условиях сварки.

В качестве объекта исследований были использованы пластины размером  $30 \times 250 \times 350$  мм, изготовленные из высокопрочной стали марки 14ХГ2САФД. Вдоль продольной оси пластин наносили канавки радиусом 3 мм, затем различными способами сварки (механизированной под флюсом и ручной электродуговой) наплавляли в них однослойные валики на ограниченных тепловложениях ( $Q_{\text{св}} \approx 10$  кДж/см), что позволило имитировать условия выполнения завершающих проходов швов большого сечения и при этом исключить воздействие различных случайных факторов. Температуру предварительного подогрева образцов изменяли от 70 до 250 °С. Запись термических циклов сварки осуществляли на осциллографе.

При автоматической сварке под флюсом без использования предварительного подогрева металл ЗТВ в течение более длительного времени, чем при ручной электродуговой, находится при температурах, превышающих 800 °С. Предварительный подогрев практически не оказывает влияния на длитель-

нод of holes in residual stress determination. Later on the solution of Kirsch's problem was used by various authors as the basis for development of the procedure for residual stress determination. Electrical strain measurement and other experimental methods were applied to measure the deformations. In the case when blind holes are used, a three-dimensional solution of the problem of the theory of elasticity is applied, which is found by one of the numerical methods.

The paper suggests the use of a three-dimensional analytical solution of the problems of the stress-strain state of a layer with a through-thickness hole under biaxial uniform tension of the layer when  $\sigma_x$  stress component changes linearly along  $oy$  axis.

A mathematical model has been constructed to determine the residual stresses. The model allows the residual stresses to be determined based on minimising the difference between the theoretical and experimental values of displacements in the drilled hole vicinity. The latter are determined by holographic interferometry method.

#### FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STEEL USING PREHEATING. L.I. Mikhodui, V.D. Poznyakov, O.L. Mikhodui (The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine).

Preheating  $T_p$  is a widely used processing operation which is practically always performed in fabrication of welded structures of high-strength bainitic-martensitic steels with  $\geq 600$  MPa yield point. Investigations of the influence of preheating on formation of residual stresses are predominantly devoted to study of the features of structural steels which differ essentially in composition and heating conditions.

The objective of these experiments was analysis of the methods to achieve a minimal level of residual stresses in the welded joints, allowing for thermal processes running under the specific conditions of welding.

$30 \times 250 \times 350$  mm plates of high-strength steel of 14KhG2CAFD grade were used as the object of investigations. Grooves of 3 mm radius were made along the plate longitudinal axis, and then single-layer beads were deposited on them by various welding processes (mechanized submerged-arc and manual arc welding) with limited heat input ( $Q_w \approx 10$  kJ/cm), which allowed simulation of the conditions of performance of the final passes of large cross-section welds, while eliminating various random factors. The temperature of sample preheating varied between 70 and 250 °C. An oscillograph was used to record the thermal cycles of welding.

In automatic submerged-arc welding without preheating, the HAZ metal stays at temperatures above 800 °C for a longer time, than in manual arc welding. Preheating practically does not influence the duration of welded joints soaking above  $A_{c3}$  point in manual arc welding and promotes its prolongation by up to 30 % in the case of submerged-arc welding. On the other hand, it permits a 2.5 to 8.0 times increase of the duration of the HAZ metal staying at temperatures above 100 °C; 1.8 to 3.5 times slowing down of the metal cooling rate in the temperature range of 600 to 500 °C ( $W_{6/5}$ ), as well as of the metal cooling rate at the temperature of 300 °C ( $W_{300}$ ).

ность пребывания сварных соединений выше точки  $A_{c3}$  при ручной электродуговой сварке и способствует ее увеличению до 30 % в случае автоматической сварки под флюсом. В то же время он позволяет в 2,5...8,0 раз увеличить продолжительность пребывания металла ЗТВ при температурах, превышающих 100 °C, в 1,8...3,5 раза замедлить скорость охлаждения металла в интервале температур 600...500 °C ( $W_{6/5}$ ), а также скорость охлаждения металла при температуре 300 °C ( $W_{300}$ ).

При помощи метода голографической интерферометрии на поверхности образцов определяли остаточные напряжения по оси валика и на различных расстояниях от нее. При сварке без предварительного подогрева во всех исследованных вариантах в продольном направлении  $\sigma_x$  сформировались остаточные растягивающие напряжения в металле шва и ЗТВ. В металле исследованных швов их значения довольно близки:  $\sigma_x = 145...170$  МПа. В металле ЗТВ при ручной электродуговой сварке они намного выше, чем при автоматической под флюсом (соответственно  $\sigma_x = 240$  и 150 МПа. Такая разница обусловлена различиями в скоростях охлаждения ниже  $A_{c3}$ , а следовательно, и степенью влияния на процесс формирования их структурных превращений.

Предварительный подогрев способствовал повышению растягивающих напряжений  $\sigma_x$  в сварных соединениях. Так, при автоматической сварке под флюсом с подогревом 70...250 °C растягивающие напряжения в швах повышались на 20...70 %. В ЗТВ сварных соединений высокопрочной стали, выполненных ручной электродуговой сваркой, предварительный подогрев соединений до 130 °C способствовал незначительному повышению напряжений (на 11...18 %), при автоматической сварке под флюсом растягивающие напряжения в металле ЗТВ увеличивались до 60 %.

В поперечном направлении относительно оси шва  $\sigma_y$  предварительный подогрев также способствовал повышению уровня растягивающих напряжений в наплавленном металле. Если его температура не превышает 130 °C, то при ручной электродуговой сварке это приводит к повышению уровня остаточных напряжений до 30 %. В равноценных условиях при механизированной сварке под флюсом такое увеличение напряжений значительно выше — до 110 %.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что с точки зрения обеспечения минимального уровня остаточных напряжений в сварных соединениях высокопрочных бейнитно-мартенситных сталей температура их предварительного подогрева не должна превышать 70...130 °C и согласовываться с особенностями протекания тепловых процессов при конкретных условиях сварки.

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ.** М.Р. Нургужин, Г.Т. Даненова (Гос. техн. ун-т, г. Караганда, Республика Казахстан). Создание расчетных методов определения критериальных характеристик механики разрушения для прогнозирования живучести элементов машиностроительных конструкций с трещиноподобными дефектами и выявление закономерностей развития трещины является актуальной задачей. В качестве критериев прочности

The method of holographic interferometry was used to determine the residual stresses on the sample surface along the bead axis and at different distances from it. In welding without preheating, tensile residual stresses developed in the weld metal and the HAZ in the longitudinal direction ( $\sigma_x$ ) in all the studied variants. Their values are rather close in the metal of the studied welds:  $\sigma_x = 145-170$  MPa. In the HAZ metal they are much higher in manual arc welding, than in automatic submerged-arc welding ( $\sigma_x = 240$  and 150 MPa, respectively). Such a difference is due to the different rates of cooling below  $A_{c3}$ , and, therefore, degree of structural transformations influence on the process of their formation.

Preheating promoted an increase of the tensile stresses  $\sigma_x$  in welded joints. So, in submerged-arc welding with preheating up to 70 to 250 °C tensile stresses in welds increased by 20-70 %. In the HAZ of high-strength steel welded joints made by manual arc welding, preheating of the joints up to 130 °C promoted a slight increase of stresses (by 11-18 %), while in automatic submerged-arc welding the tensile stresses in the HAZ metal increased up to 60 %.

In the transverse direction relative to the weld axis ( $\sigma_y$ ) preheating also promoted an increase of the level of tensile stresses in the deposited metal. If its temperature does not exceed 130 °C, in manual arc welding it leads to an increase of the residual stress level up to 30 %. Under equivalent conditions in mechanised submerged-arc welding this increase of stresses is much higher, namely up to 110 %.

The performed investigations demonstrate that with the view to provision of a minimal level of residual stresses in welded joints of high-strength bainitic-martensitic steels, their preheating temperature should not exceed 70-130 °C and should allow for the features of thermal processes running under the specific conditions of welding.

**METHODS OF AUTOMATED CALCULATION OF CRITICAL CHARACTERISTICS OF FRACTURE MECHANICS.** M.R. Nurguzhin, G.T. Danenova (State Techn. Univ., Karaganda, Kazakhstan Republic). Development of calculation methods for determination of critical characteristics of fracture mechanics for forecasting the viability of mechanical engineering structure elements with cracklike defects and establishment of the laws of crack propagation is an urgent task. The stress intensity factor (SIF),  $J$  energy integral, crack tip opening dis-

используются коэффициент интенсивности напряжений, энергетический интеграл  $J$ , раскрытие трещины, а также размахи КИН и интеграла  $J$ . Наиболее реально учет указанных факторов можно осуществлять только при помощи соответствующих компьютерных систем, приближенных к конечному пользователю. На кафедре САПР КарГТУ создан программный методический комплекс (ПМК) CRACK, реализующий метод конечных элементов (МКЭ) в нелинейной постановке с использованием критериев механики разрушения.

Данный программный комплекс позволяет осуществлять расчет критериев механики разрушения; решение плоских упругопластических задач. Расчетные методы основываются на использовании МКЭ в двумерной постановке с применением теорий течения и деформации в режимах плоской деформации и плоского напряженного состояния при помощи персональных компьютеров 486 и др.

В данной работе использовали метод полной энергии и метод интеграла  $J$  для определения коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$ . Интеграл  $J$  определяют различными способами:  $J_I$  — по зависимости Райса,  $J_m$  — по зависимости Меркла-Кортена,  $J_k$  — контурный интеграл  $J$ .

ПМК CRACK состоит из препроцессора, процессора и постпроцессора. Первый включает подготовку исходных данных и предназначен для помощи оператору при формировании плоской модели объекта, ее дискретизации. Исходными данными являются размеры образца и трещины, ее положение, физико-механические параметры материала.

В программном комплексе имеется база данных, включающая дискретные модели типовых сварных конструкций. Дискретная модель выводится на экран и печать. Также в ПМК CRACK предусмотрено масштабирование модели.

Процессор предназначен для анализа сварных конструкций с трещиноподобными дефектами и расчета напряженно-деформированного состояния конструкций, а также для определения критериев прочности механики разрушения.

Постпроцессор позволяет представить результаты расчета в удобном для пользователя виде (текстового отчета, графиков и таблиц).

При помощи ПМК CRACK исследован ряд типовых сварных соединений с трещинами, получены аналитические формулы для расчета критериев прочности механики разрушения.

**РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ.** В. А. Осадчук, І. Б. Назар (Держ. ун-т «Львівська політехніка», м. Львів, Україна). Залишкові напруження та деформації, що виникають внаслідок зварювання елементів конструкцій, істотно впливають на їх міцність, точність виготовлення і несучу здатність. Через складність фізико-хімічних процесів, якими супроводжується зварювання, математичні моделі, що враховують ці процеси у всій їх сукупності, дають змогу розрахувати поле залишкових деформацій і напружень тільки в окремих випадках. Особливої труднощі виникають при оцінці залишкових напружень в процесі діагностування конструкцій і споруд, оскільки на їх рівень, крім технологічних режимів зварювання, може

впливати, а також SIF and  $J$  ranges are used as strength criteria.

The above factors can be taken into account in the most realistic manner only through appropriate computer systems oriented to the end user. The CAD chair of KarSTU developed a CRACK procedural program system (PPS) implementing FEM in non-linear definition in terms of fracture mechanics criteria.

This program system permits calculation of fracture mechanics criteria and solving plane elasto-plastic problems. Calculation procedures are based on FEM in two-dimensional definition using the theory of flow and deformation in the plane deformation and plane stressed state modes, performed in 486 and other personal computers.

In this study SIF was determined by the method of total energy and  $J$ -integral. Various procedures are used to determine  $J$ -integral, namely  $J_I$  — from Riesz dependence,  $J_m$  — from Merkle-Korten dependence,  $J_k$  — as a contour  $J$ -integral.

CRACK PPS incorporates a preprocessor, processor and postprocessor. The first includes preparation of initial data and is designed to help the operator in formation of the plane model of the object and its discretization. The initial data are the dimensions of the sample and the crack, its position, physical-mechanical parameters of the material.

The program system incorporates a data base, which contains discrete models of typical welded structures. A discrete model can be displayed and printed-out. CRACK PPS also provides the capability of model scaling.

The processor is designed for analysis of welded structures with cracklike defects and calculation of the stress-strain state of the structure, as well as for determination of the fracture mechanics criteria.

The postprocessor enables the calculation results to be presented in a format convenient for the user (textual report, graphs and tables).

CRACK PPS was used to study a number of typical welded joints with cracks, and analytical equations were derived for calculation of the fracture mechanics criteria.

#### CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD OF DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURE WELDED ELEMENTS. V.A. Osadchuk, I.B. Nazar

(«Lvivska Polytekhnika» State University, Lviv, Ukraine). Residual stresses and strains developing as a result of welding the elements of structures, essentially influence their strength, fabrication accuracy and load-carrying capacity. In view of the complexity of the physical-chemical processes accompanying welding, the mathematical models which take into account the entire set of these processes, permit calculation of the field of residual strains and stresses only in some cases. Particular difficulties are encountered in evaluation of the residual stresses during diagnostic of the structures and constructions, as their level can be influenced by a whole range of other factors, besides the welding modes. Non-

впливати ціла низка інших чинників. Неруйнівні фізичні методи, за винятком простих випадків, також не дозволяють визначити повну картину розподілу залишкових напружень. Тому актуальною є проблема розробки розрахунково-експериментальних методів визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях, особливо після часткової термообробки і діагностування конструкцій в процесі експлуатації з метою визначення їх залишкового ресурсу.

Наведено основи одного з таких методів, що є розвитком ідеї Є. О. Патона про визначення зварювальних напружень і деформацій на основі функцій усадження. Він ґрунтується на використанні рівнянь механіки тіл із власними напруженнями, а також інформації, одержаної за допомогою експериментальних методів (фотопружності, магнітного, ультразвукового, голографічної інтерферометрії тощо).

Суть методу полягає ось у чому. Спочатку записуються основні співвідношення механіки деформованого твердого тіла з залишковими напруженнями, які отримуються з використанням зображення компонент тензора малої деформації  $\{e_{ij}\}$  у вигляді суми

$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^0$ , де  $e_{ij}^e$ ,  $e_{ij}^0$  — компоненти тензора відповідно повної деформації та умовних пластичних деформацій, несумісність яких зумовлює виникнення залишкових напружень. При цьому поле  $e_{ij}^0$  враховує також різного роду фазові та структурні перетворення, що супроводжуються зміною об'єму матеріалу. Далі з урахуванням апріорної інформації, зокрема про локальний розподіл умовних пластичних деформацій біля шва, поле  $e_{ij}^0$  зображаємо у вигляді тензора функції, яка залежить від певної кількості довільних параметрів. Потім цю функцію підставляємо у розв'язувальні рівняння і будемо їх розв'язки, що залежать від невідомих параметрів. На основі отриманих розв'язків та відповідних формул для визначення напружень записуємо вирази для обчислення залишкових напружень в довільній точці досліджуваного зварного елемента конструкції. У ці вирази увійдуть невідомі параметри, які описують функцію  $e_{ij}^0$ . Для їх знаходження використовуємо інформацію, яку в певних перерізах можна отримати одним із експериментальних методів або за допомогою їх синтезу, і будемо функціонал, мінімізація якого забезпечує мінімальне відхилення теоретично обчислених  $I_K^T$  від експериментальних

$I_K^E$  характеристик полів напружень (зокрема, середньоінтегральних по товщині елемента конструкції різниць головних напружень). Знайшовши невідомі параметри, записуємо функцію  $e_{ij}^0$  і обчислюємо всі компоненти тензора напружень, зокрема ті, які не можна отримати експериментально. При цьому обґрунтовується належність задачі про зварювальні залишкові напруження у запропонованій постановці до класу обернених задач, коректних за Тихоновим, і будуються відповідні регуляризуючі алгоритми.

З використанням цього методу досліджено розподіл залишкових напружень біля кільцевого зварного шва в круговій циліндричній оболонці і просторовий розподіл залишкових напружень в пластинах з кристалічними і круговими швами.

destructive physical methods, except for some simple cases, do not provide a complete pattern of residual stress distribution, either. Therefore, urgent is the problem of development of calculation-experimental methods of determination of residual stresses in welded joints, especially after their partial heat treatment and diagnostic of structures in service to determine their residual life. Given below are the fundamentals of one of such methods which is a development of an idea of E.O.Paton on determination of welding stresses and strains from shrinkage functions, and is based on the use of equations of the mechanics of bodies with inherent stresses, and the information derived by experimental methods (photoelasticity, magnetic, ultrasonic, holographic interferometry methods, etc.).

The essence of the method is as follows. First the main relationships of the mechanics of a deformable solid with residual stresses are written, which are derived from the images of components of a small deformation tensor  $\{e_{ij}\}$  in the form of sum  $e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^0$ , where

$e_{ij}^e$ ,  $e_{ij}^0$  are the components of the tensor of total deformation and of the conditional plastic deformations, the incompatibility of which gives rise to residual stresses, respectively. Field  $e_{ij}^0$  also allows for various kinds of

phase and structural transformations which are accompanied by a change in the material volume. Further on, taking into account a priori information, in particular, on the local distribution of the conditional plastic deformations in the vicinity of the weld, field  $e_{ij}^0$  is represented as the tensor of a function which depends on a certain number of arbitrary parameters. Then, this function is substituted into the equations being solved and their solutions are derived which depend on unknown parameters. Expressions for calculation of residual stresses in an arbitrary point of the studied welded element of the structure, are written proceeding from the derived solutions and appropriate equations for stress determination. These expressions will include unknown parameters which describe  $e_{ij}^0$  function. They are defined using information which can be derived for certain sections by one of the experimental methods or through their synthesis, and a functional is constructed whose minimisation provides a minimal deviation of the theoretically calculated  $I_K^T$  from experimental  $I_K^E$  characteristics of the stress fields (in particular, differences in principal stresses, which are integral mean values across the element thickness). Having derived the unknown parameters,  $e_{ij}^0$  function is written and all the components of the stress tensor are calculated, in particular, those which cannot be experimentally derived.

The problem of residual welding stresses in the proposed definition belonging to the class of inverse problems correct by Tikhonov, is substantiated, and appropriate regularising algorithms are plotted.

This method is used to investigate the residual stress distribution in the vicinity of a circumferential weld in a circular cylindrical shell and the spatial distribution of

На основі чисельного аналізу задач про розподіл залишкових напружень в товстих пластинах з круговими і прямолінійними швами встановлено, що напружений стан біля швів має об'ємний характер, а значні градієнти по товщині пластини навіть невеликих за рівнем нормальних до поверхні пластини і дотичних напружень викликають суттєвий перерозподіл по товщині пластини інших компонент тензора напружень.

#### МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ.

*В.М.Палаш, В.М. Юськів, А.Р. Дзюбик (Держ. ун-т «Львівська політехніка», м. Львів, Україна).* Міцність

та надійність трубопроводів значною мірою залежать від різноманітних технологічних операцій, особливо зварювання. Через складність фізико-хімічних процесів, якими супроводжується їх виготовлення, досі не розроблено моделі, яка дала б змогу розрахувати поле залишкових деформацій і напружень з урахуванням таких процесів у всій сукупності.

У зв'язку з цим актуальною є розробка розрахунково-експериментальних методів, які на основі доступної експериментальної інформації дозволили б відтворити максимально наближену картину розподілу залишкових напружень.

Один з таких методів ґрунтується на розв'язанні обернених задач механіки деформованих тіл із залишковими деформаціями і використанні експериментальної інформації, отриманої за допомогою неруйнівних фізичних методів.

Базовими є рівняння деформованих твердих тіл, які враховують наявність умовних пластичних деформацій, що описуються тензорним полем  $\epsilon_{ij}^0$ . З урахуванням апріорної інформації про розподіл цих деформацій будується представлення розв'язків прямої задачі і записуються вирази для напружень, в які входять невідомі параметри поля  $\epsilon_{ij}^0$ . Для їх знаходження використовується експериментальна інформація про поле напружень (зокрема про усереднені характеристики компонентів тензора напружень) і будується функціонал, мінімізація якого забезпечує мінімальне відхилення теоретично обчислених від експериментальних характеристик полів напружень. Після знаходження параметрів, що описують поле  $\epsilon_{ij}^0$ , обчислюються напруження у довільній точці елемента конструкції.

Експериментальну інформацію про напружений стан трубопроводу було отримано за допомогою ультразвукового методу (усереднені по товщині значення головних напружень), а також методу термоелектрорушійної сили (напруження на поверхні трубопроводу). Для визначення рівня термоелектрорушійної сили в польових умовах був розроблений і виготовлений спеціальний прилад. Отримані результати показали, що даний розрахунково-експериментальний метод дозволяє відтворити поле залишкових напружень магістральних трубопроводів.

residual stresses in plates with curvilinear and circumferential welds.

Numerical analysis of the problems of distribution of residual stresses in thick plates with circumferential and rectilinear welds revealed that the stressed state near the welds is of a bulk nature, whereas the considerable gradients across the plate thickness of even small in value stresses normal or tangential to the plate surface, give rise to an essential redistribution of other components of the stress tensor across the plate thickness.

#### METHOD OF DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN MAIN PIPELINES. *V.M.Palash, V.M.*

*Yuskiv, A.R.Dzyubik ("Lvivska Polytekhnika" State University, Lviv, Ukraine).* Pipeline strength and reliability

largely depend on various technological operations, especially welding. In view of the complexity of physical-chemical processes involved in their fabrication, no model has so far been developed which would permit calculation of the field of residual stresses and strains, allowing for such processes in their totality. In this connection, it is urgent to develop design and experimental methods which proceeding from the available experimental information, would permit reproducing the pattern of residual stress distribution as close as possible to the real one. One of such methods is based on solving inverse problems of mechanics of deformable bodies with residual deformations and using experimental information derived by non-destructive physical methods. The basic equations are those of deformable solids, which allow for the conditional plastic deformations described by tensor field  $\epsilon_{ij}^0$ . Taking into account a priori information on these deformations distribution, the representation of the primal problem solutions is constructed and the expressions for stresses, which incorporate the unknown field parameters, are written. In order to find these parameters, experimental information on the stress field (in particular, on averaged characteristics of stress tensor component) is used and a functional is constructed whose minimising provides a minimal deviation of the theoretically calculated stress field characteristics from experimental values. Having found the parameters describing fields  $\epsilon_{ij}^0$ , stresses in an arbitrary point of the structural element are calculated. Experimental information on the pipeline stressed state was derived by means of the ultrasonic method (values of principal stresses averaged by thickness), as well as the method of thermoelectromotive force (stresses on the pipeline surface). A special instrument has been developed and made, in order to determine the values of thermoelectromotive force in the field conditions. The derived results demonstrated that the design-experimental method permits reproduction of the residual stress field of the main pipelines.

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМУВАННЯМ СТАНОМ ІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З ЗАЛИШКОВИМИ ДЕФОРМАЦІЯМИ.** Н. І. Поліщук (Ін-т приклад. пробл. механіки і математики ім. Я. С. Підстригача, м. Львів, Україна). Розглянуто тонку ізотропну циліндричну оболонку, вільну від силового навантаження з початковими непружними деформаціями  $\hat{e}^{(0)}$ , які викликають залишкові напруження. Слід зауважити, що ці непружні початкові деформації виникають в зварних оболонках після завершення процесу зварювання і охолодження конструкції. Ставиться задача про цільовий нагрів такої оболонки з метою створення додаткових термопластичних деформацій  $\hat{e}^{(d)}$ , які разом з початковими  $\hat{e}^{(0)}$  забезпечують зняття або оптимальне зниження рівня залишкових напружень.

Сумарні непружні деформації позначимо через  $\hat{e}^{(0)}$ , тобто

$$\hat{e}^{(0)} = \hat{e}^{(n)} + \hat{e}^{(d)}$$

Розв'язання цієї задачі складається з двох частин. Спочатку з використанням методів варіаційного числення з мінімізації функціоналу енергії пружної деформації визначається оптимальний розподіл сумарних непружних деформацій  $\hat{e}^{(0)}$ . З розв'язку варіаційної задачі отримуємо систему рівнянь Ейлера, яка відповідає умовам сумісності непружних деформацій, і систему граничних умов. Аналіз показує, що оптимальними термопластичними деформаціями  $\hat{e}^{(d)}$  будуть рівні за значенням  $\hat{e}^{(n)}$ , але протилежні за знаком.

Слід зауважити, що для отримання цих результатів використовували класичну теорію тонких оболонок із застосуванням гіпотези Кірхгофа-Лява, а також лінійний закон зміни непружних деформацій по товщині оболонки.

Друга частина розв'язання задачі полягає в побудові режимів керованого термопластичного деформування і складається з трьох етапів.

На першому етапі в інтервалі часу  $I_1 = \{\tau : 0 < \tau < \tau_1\}$  вся оболонка в процесі нагрівання деформується пружно. При цьому температурне поле, яке забезпечує це деформування, приймається у вигляді

$$t(r, \tau) = a(\tau)t(r, \tau_1),$$

де  $a(\tau)$  — монотонна змінна в часі функція;  $t(r, \tau_1)$  — температурне поле в момент  $\tau = \tau_1$  входження області  $\Omega$  оболонки, де знаходяться оптимальні  $\hat{e}^{(n)}$ , в режим активного термопластичного деформування. На другому етапі на проміжку часу  $I_2 = \{\tau : \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2\}$  внаслідок відповідного режиму нагрівання забезпечуються умови такого термопластичного деформування, що при  $\tau = \tau_2$  реалізується розрахунковий оптимальний розподіл непружної деформації  $\hat{e}^{(n)} = \hat{e}^{(n)} + \hat{e}^{(d)} \equiv \hat{e}^{(0)}$ . Визначене температурне поле одночасно має забезпечувати пружне деформування поза межами області  $\Omega$ .

При розгляді активного термопластичного деформування в області  $\Omega$  використовуються співвідношення теорії текучості Мізеса для ідеально пластич-

**FUNDAMENTALS OF OPTIMUM CONTROL OF STRESS-STRAIN STATE OF ISOTROPIC CYLINDRICAL SHELLS WITH RESIDUAL STRAINS.** N.I. Polishchuk (Ya.S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine). A thin isotropic cylindrical shell is considered, which is free from force loading and has initial non-elastic deformations  $\hat{e}^{(0)}$  inducing residual stresses. Note that these initial non-elastic deformations arise in welded shells after completion of the welding process and structure cooling. A problem is defined of a purposeful heating of such a shell with the aim of inducing additional thermoplastic deformations  $\hat{e}^{(d)}$  which together with initial deformations  $\hat{e}^{(0)}$  provide a relieving or optimal lowering of the residual stress level. Let us designate the total non-elastic deformations as  $\hat{e}^{(0)}$ , i.e.:

$$\hat{e}^{(0)} = \hat{e}^{(n)} + \hat{e}^{(d)}$$

Solution of this problem consists of two parts. First, variational calculation methods with minimising of the elastic deformation energy functional are used to determine the optimal distribution of the total non-elastic deformations  $\hat{e}^{(0)}$ . Solution of the variational problem yields a system of Euler's equations which satisfies the conditions of non-elastic deformation compatibility, and a system of limiting conditions. Analysis shows that such thermoplastic deformations  $\hat{e}^{(d)}$  will be the optimal ones which are equal in value to  $\hat{e}^{(n)}$ , but opposite in sign. Note that the classical theory of thin shells with application of Kirchhoff-Lyav hypothesis and the linear law of non-elastic deformation variation across the shell thickness were used to generate these results.

The second part of the problem solution is construction of the modes of controlled thermo-plastic deformation, which consists of three stages.

In the first stage, in the time interval  $I_1 = \{\tau : 0 < \tau < \tau_1\}$  the entire shell deforms elastically in heating. Here the temperature field which creates this deformation, is taken to be:

$$t(r, \tau) = a(\tau)t(r, \tau_1),$$

where  $a(\tau)$  is the monotonic change of the function in time,  $t(r, \tau_1)$  is the temperature field at the moment  $\tau = \tau_1$  of shell region  $\Omega$  with optimal  $\hat{e}^{(n)}$  values, going into the mode of an active thermoplastic deformation. In the second stage in time interval  $I_2 = \{\tau : \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2\}$ , as a result of an appropriate heating mode, the conditions for such thermoplastic deformation are provided that at  $\tau = \tau_2$  the calculated optimal distribution of non-elastic deformation  $\hat{e}^{(n)} = \hat{e}^{(n)} + \hat{e}^{(d)} \equiv \hat{e}^{(0)}$  is achieved. The sought temperature field should simultaneously provide elastic deformation beyond  $\Omega$  region.

When active thermoplastic deformation in  $\Omega$  region is considered, the relationships of von Mises flow theory for ideally plastic bodies are used. The temperature fields are selected so that plastic deformation corres-

них тіл. Температурні поля підбирають таким чином, щоб пластичне деформування відповідало невеликому околу фіксованої точки поверхні текучості Мізеса. У рамках такого обмеження умова текучості Мізеса та асоційований з нею закон пластичного течіння лінеаризується в околі досліджуваної точки поверхні текучості. Температурне поле в області пружного деформування на проміжку  $I_2$  визначається з розв'язку відповідної варіаційної задачі на мінімізацію пружного стану за критерієм функціоналу енергії формозміни.

На третьому етапі нагрівання оболонки для інтервалу часу  $I_3 = (\tau: \tau > \tau_2)$  за температурне поле, яке забезпечує пружне розвантаження області пружнопластичного деформування  $\Omega$  при пружному деформуванні решти оболонки, приймається температурне поле, що отримується в умовах природного охолодження оболонки.

Запропоновані теоретичні основи розв'язання задачі оптимального керування напружено-деформованим станом тонких ізотропних оболонок із залишковими деформаціями дали можливість зняти залишкові напруження в околах меридіонального і кільцевого перетинів.

**ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЗМІНУ ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ І КОРОЗИЙНУ ВТОМУ  $(\alpha+\beta)$ -СПЛАВУ ТИТАНУ.** В. І. Похмурський, О. С. Калахан (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, м. Львів, Україна). При експлуатації конструкцій із псевдо- $\alpha$ -сплавів виявлено, що застосування термічної обробки для зняття залишкових зварювальних напружень не тільки не підвищує надійність і довговічність конструкцій, але в ряді випадків, особливо при використанні високоміцних псевдо- $\alpha$ -сплавів титану, катастрофічно знижує статичну та циклічну міцність виробів, що експлуатуються в корозійному середовищі.

Мета роботи — вивчити вплив термічної обробки для зняття залишкових зварювальних напружень на втомне руйнування титанового  $(\alpha+\beta)$ -сплаву.

Використовували деформований у  $\beta$ - та  $(\alpha+\beta)$ -областях сплав, що містив 5 % Al; 1,5 % V; 1 % Mo (листи з  $\sigma_b = 913$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 882$  МПа,  $\delta = 13$  %,  $\psi = 31$  %,  $KCV = 64$  Дж/см<sup>2</sup> та кований сплав з  $\sigma_b = 1010$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 900$  МПа,  $\delta = 12$  %,  $\psi = 35$  %,  $KCV = 41$  Дж/см<sup>2</sup>). Зварні з'єднання отримували способом електронно-променевого зварювання. Зразки піддавали неповному відпалу при температурі 675 °C протягом 10 год.

Випробування проводили на стандартних циліндричних зразках з діаметром робочої частини 5 мм та з V-подібним кільцевим вирізом ( $\rho = 0,5$ ;  $\alpha_c = 1,99$ ) при навантаженні чистим згином з обертанням у повітрі та в 3%-му розчині NaCl.

Встановлено, що оксидні плівки, які сформувалися при неповному відпалі сплаву — щільні, добре зчеплені з поверхнею. Товщина їх змінювалася у межах 3...12 мкм. Основною фазовою складовою оксидних плівок є рутил TiO<sub>2</sub>. Глибина газонасиченої зони сягала  $\approx 60$  мкм, поверхнева мікротвердість — 6,0...6,1 ГПа при мікротвердості серцевини сплаву 4,8...4,9 ГПа. Після відпалу структура основного металу

понаходилася до невеликої області навколо фіксованої точки поверхні текучості Мізеса. У рамках такого обмеження умова текучості Мізеса та асоційований з нею закон пластичного течіння лінеаризується в околі досліджуваної точки поверхні текучості. Температурне поле в області пружного деформування на проміжку  $I_2$  визначається з розв'язку відповідної варіаційної задачі на мінімізацію пружного стану за критерієм функціоналу енергії формозміни.

На третьому етапі нагрівання оболонки для інтервалу часу  $I_3 = (\tau: \tau > \tau_2)$  за температурне поле, яке забезпечує пружне розвантаження області пружнопластичного деформування  $\Omega$  при пружному деформуванні решти оболонки, приймається температурне поле, що отримується в умовах природного охолодження оболонки.

Запропоновані теоретичні основи розв'язання задачі оптимального керування напружено-деформованим станом тонких ізотропних оболонок із залишковими деформаціями дали можливість зняти залишкові напруження в околах меридіонального і кільцевого перетинів.

**EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CHANGES IN RESIDUAL WELDING STRESSES AND CORROSION FATIGUE OF  $(\alpha+\beta)$  TITANIUM ALLOY.** V.I. Pokhmursky, O.S. Kalakhan (H.V. Karpenko Phys.-Mech. Inst., NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine). Service of structures from pseudo-alpha alloys revealed that heat treatment performed for relieving the residual welding stresses not only does not improve the reliability and fatigue life of structures, but in a number of cases, especially, in the case of high-strength pseudo-alpha titanium alloys catastrophically lowers the static and cyclic strength of the items exposed to corrosive medium in service.

The purpose was to study the influence of the heat treatment to relieve the residual welding stresses on fatigue fracture of  $(\alpha+\beta)$  titanium alloy. An alloy deformed in the  $\beta$  and  $(\alpha+\beta)$  regions with 5 % Al; 1.5 % V; 1 % Mo (sheets with  $\sigma_t = 913$  MPa,  $\sigma_y = 882$  MPa,  $\delta = 13$  %,  $\psi = 31$  %,  $KCV = 64$  J/cm<sup>2</sup>) and a forged alloy with  $\sigma_t = 1010$  MPa,  $\sigma_y = 900$  MPa,  $\delta = 12$  %,  $\psi = 35$  %,  $KCV = 41$  J/cm<sup>2</sup> were used. The welded joints were produced by electron beam welding (EBW). The samples were partially annealed at the temperature of 675 °C for 10 hours. Testing was conducted on standard cylindrical samples with 5 mm gauge diameter and V-shaped circular notch ( $\rho = 0.5$ ;  $\alpha_c = 1.99$ ) loaded by pure torsion bending in air and in 3 % NaCl solution.

It is found that the oxide films which formed at partial annealing of the alloy, are dense, and adhere well to the surface. Their thickness varied from 3 to 12  $\mu$ m. The main phase of the oxide films is TiO<sub>2</sub> rutile. The depth of the gas-saturated zone was approximately 60  $\mu$ m, surface microhardness being 6.0 to 6.1 GPa with 4.8 to 4.9 GPa microhardness in the alloy center. After annealing the base metal structure was practically unchanged, just the number of small globules along the former  $\beta$ -grain boundaries increased.

It is shown that the rolled stock samples have high fatigue properties ( $\sigma_{-1} = 470$  MPa,  $0.51\sigma_t$ ), the alloy, how-

талу практично не змінилася, лише збільшилася кількість дрібних глобул на границях колишніх  $\beta$ -зерен.

Показано, що зразки з прокату виявляють високі показники втомних характеристик ( $\sigma_{-1} = 470$  МПа,  $0,51\sigma_B$ ), однак сплав є дуже чутливим до концентрації напружень. Опір втомі надрізаних зразків знижується до 150 МПа, ефективний коефіцієнт концентрації напружень при цьому становить 3,1.

Відпал призводить до окрихчення досліджуваного сплаву в повітрі:

- опір втомі гладких зразків основного металу знижується на 20 та 15 % для гладкого зварного з'єднання;
- границя втоми зварного з'єднання із конструктивним концентратором напружень знижується в 2,3 рази ( $\approx 60\%$   $\sigma_{-1}$  невідпаленого зразка), що обумовлено внутрішніми структурними дефектами зварного шва, залишковими напруженнями.

Виявлено неоднозначний вплив відпалу на корозійно-втомну міцність сплаву та його зварних з'єднань:

- зниження до 40 % границі корозійної втоми основного металу, що пов'язано з утворенням в структурі передвиділених  $\alpha_2$ -фази та з наявністю в приповерхневих шарах оксиду  $Al_2O_3$ , який не утворює стабільної сполуки з  $TiO_2$ , а також границь втоми зразків з концентраторами напружень основного металу та його зварних з'єднань;
- відпал зварних з'єднань не погіршує їх корозійно-втомну міцність внаслідок розпаду мартенситної  $\alpha'(\alpha'')$ -фази в металі шва та в зоні термічного впливу з виділенням корозійно малоактивних дисперсних часток стабільних  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз.

Результати досліджень аналізуються щодо можливих причин неоднозначного впливу неповного відпалу на втомне, корозійно-втомне руйнування титанового ( $\alpha+\beta$ )-сплаву та його зварних з'єднань.

#### КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. А. Н. Серенко (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь, Украина). Создание сварных конструкций заданной надежности при минимальной стоимости требует комплексного конструктивно-технологического проектирования, при котором вопросы прочности и надежности увязываются с особенностями физических процессов, протекающих в металле под воздействием технологических процессов, в особенности сварочных.

Для выбора наилучших вариантов конструктивного оформления проектируемого узла и технологических параметров сборочно-сварочных операций необходимо использовать методы вариантного проектирования и оптимизации, основанные на поиске глобального оптимума обобщенной целевой функции.

Современные технические и программные средства персональных компьютеров позволяют создавать информационную поддержку, необходимую для принятия решений при конструктивно-технологическом проектировании сварных конструкций.

Трудности создания такой системы связаны в основном с увязкой разнообразных математических моделей, описывающих явления и процессы, возникающие как при выполнении сборочно-сварочных операций, так в период последующей эксплуатации сварной конструкции.

ever, being highly sensitive to stress concentration. The fatigue resistance of notched samples drops to 150 MPa, the effective stress concentration factor being 3.1 in this case.

Annealing leads to embrittlement of the studied alloy in air: fatigue resistance of smooth samples of the base metal decreases by 20 % and that of the smooth welded joint by 15 %, fatigue limit of the welded joint with the structural stress raiser decreases by 2.3 times ( $\approx 60\%$  of  $\sigma_{-1}$  of unannealed sample) which is due to inner structural defects of the weld and residual stresses.

A complex influence of annealing on corrosion fatigue strength of the alloy and its welded joints was found, namely lowering to 40 % of the base metal corrosion fatigue limit which is related to formation of  $\alpha_2$ -phase preprecipitations in the structure and the presence of  $Al_2O_3$  oxide in the subsurface layers, which does not form a stable compound with  $TiO_2$ , as well as of fatigue limits of the samples with stress raisers of the base metal and its welded joints;

annealing of welded joints does not impair their corrosion-fatigue strength as a result of decomposition of martensite  $\alpha'(\alpha'')$ -phase in the weld metal and in the heat-affected zone with precipitation of low-corrosive disperse particles of stable  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases.

The results of investigations are analysed for the possible causes of the complex influence of partial annealing on the fatigue and corrosion-fatigue fracture of ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloy and its welded joints.

#### COMPUTER SYSTEM OF DESIGN-TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF WELDED STRUCTURES. A. N. Serenko (Priazov. State. Techn. Univer., Mariupol, Ukraine).

Creation of welded structures of the specified reliability at minimal cost requires an integrated development of their design and technology when the issues of strength and reliability are correlated with the features of the physical processes running in the metal under the impact of the technological factors, especially welding factors. In order to select the optimal variants of design of the developed assembly and technological parameters of assembly-welding operations, it is necessary to use the methods of variant design and optimisation based on the search for a global optimum of the generalised efficiency function.

The up-to-date hardware and software means of personal computers permit elaboration of information support required for taking decisions in development of the welded structure design and technology. The difficulties in creation of such a system are mainly related to correlation of various mathematical models describing the phenomena and processes encountered both in performance of the assembly-welding operations and during the subsequent service of the welded structure. Given the general procedure of searching for the solution of the defined problem, the system should be created step-by-step using up-to-date tools, for instance DELPHI, which provide a WINDOWS-oriented user in-

С учетом общей схемы поиска решения поставленной задачи необходимо поэтапное создание системы при помощи современных инструментальных средств, например DELPHI, которые позволяют получать WINDOWS-ориентированный интерфейс пользователя, вводить базы данных в общепринятых форматах, использовать мощные программы математической поддержки (например MATHCAD).

Одним из основных модулей разрабатываемой системы является модуль вероятностной оценки несущей способности конструкции на основе определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений при различных схемах внешнего воздействия. Задача решается как посредством использования готовых программных продуктов соответствующего назначения, так и специально создаваемыми методами упрощенного поиска компонент напряжений в локальных областях с учетом изменяющихся механических характеристик материала (на основе теории макронапряжений) под воздействием процесса сварки.

**МЕХАНО-КОРРОЗИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ СООРУЖЕНИЙ.** А. Х. Смирнов (РГУ НГ им. И. М. Губкина, г. Москва, РФ). Освоение морских нефтегазовых месторождений континентального шельфа относится к числу приоритетных задач. В настоящее время около 40 % мировой добычи углеводородов приходится на шельф морей и океанов. Российская Федерация имеет наиболее обширный шельф, составляющий 5 млн км<sup>2</sup>, на котором в пересчете на условное топливо сосредоточено до 100 млрд т углеводородов, что составляет треть мировых морских запасов нефти и газа. Технические средства для освоения шельфа, к которым в первую очередь относятся морские нефтегазопромысловые сооружения (МНГС) эксплуатируются в условиях экстремальных технологических, природных нагрузок и воздействий.

Надежность и долговечность МНГС определяется целым рядом факторов и их взаимодействиями, в том числе влиянием морской воды как коррозионно-активной среды на комплекс основных эксплуатационных свойств (статическая прочность и долговечность) сварных соединений и узлов.

Предлагается системный подход, базирующийся на основных принципах мониторинга сварных конструкций, функционирующих в агрессивных средах, который заключается в применении комплекса скоординированных мероприятий при проведении поисковых и научно-исследовательских работ на всех стадиях проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации МНГС и включает следующие блоки:

- обобщение, систематизация и анализ результатов механических, коррозионных, коррозионно-механических, в том числе коррозионно-усталостных испытаний сварных образцов-имитаторов типовых элементов, моделей узлов и фрагментов конструкций, данных исследований причин аварий и катастроф аналогичных объектов;
- анализ природно-климатических и гидрометеорологических особенностей нефтегазоносной акватории,

терфак, permit entering the data bases in the universally accepted formats, and use of powerful mathematical support programs (for instance, MATHCAD).

One of the main modules of the developed system is the module of probabilistic evaluation of the load-carrying capacity of the structure based on determination of the stress-strain state of welded joints with various external impact schematics. The problem is solved both by means of ready software for appropriate purpose and specially developed methods of a simplified search for stress components in the local areas allowing for the changing mechanical properties of the materials (based on macrostresses theory) under the impact of the welding process.

**MECHANICAL-CORROSION RELIABILITY AND FATIGUE LIFE OF WELDED STEEL ELEMENTS AND MEMBERS OF LOAD-CARRYING STRUCTURES OF OFF-SHORE OIL AND GAS PRODUCTION CONSTRUCTIONS.** A. Kh. Smirnov (I. M. Gubkin RSU NG, Moscow, Russia). Mastering of off-shore oil and gas fields on the continental shelf is one of the priority tasks. About 40 % of the world production of hydrocarbons is currently located in the sea and ocean shelf. The Russian Federation has the most extensive shelf of 5 mln. km<sup>2</sup>, in which up to 100 bln. tons of hydrocarbons in fuel equivalent are concentrated, this being equal to one third of the world sea deposits of oil and gas. The technical facilities for mastering the shelf, which first of all are the off-shore oil and gas production constructions (OSOGPC) are operated under the conditions of extreme technological and natural impacts

The OSOGPC reliability and fatigue life is determined by a number of significant factors and their interaction, including the influence of sea water as a corrosive medium on the set of the main service properties (static strength and fatigue life) of welded joints and components.

A systemic approach is proposed based on the main principles of monitoring the welded structures functioning in aggressive media, which consists in taking a set of coordinated measures in performance of the feasibility studies and research at all the stages of OSOGPC design, construction, operation and salvaging and includes the following blocks:

- generalisation, systematising and analysis of the results of mechanical, corrosion, corrosion-mechanical tests, including corrosion-fatigue testing of welded samples-simulators of typical elements, models of assemblies and fragments of the structures, data of investigation of causes for accidents and collapse of similar facilities;
- analysis of the natural, climatic and hydrometeorological features of the oil- and gas-bearing water area, including the results of full-scale corrosion and corrosion-mechanical testing for evaluation and forecasting of the schematic, nature and dynamics of individual service failure of elements and components of the facility, selection of the anticorrosion protection system, determination of the effectiveness of special methods of the joints treatment, etc.;

в том числе результаты натурных коррозионных и коррозионно-механических испытаний для оценки, прогнозирования схемы, характера и динамики индивидуального эксплуатационного разрушения элементов и узлов объекта, выбора системы антикоррозионной защиты, определения эффективности использования специальных методов обработки соединений и пр.;

- выбор конструктивных форм, материалов и технологий с учетом необходимости достижения достаточного уровня показателей механических, коррозионных и коррозионно-механических характеристик сварных элементов и узлов с учетом эффективности и долговечности антикоррозионных мероприятий, а также целесообразность применения различных улучшающих технологических послесварочных воздействий;
- разработка (выбор) технологии и организация пооперационного контроля за процессом строительства и монтажа МНГС в целях достижения заданного уровня конструктивно-технологической наследственности сварных соединений и узлов, эффективности улучшающих послесварочных обработок, системы антикоррозионной защиты и т.д., обеспечивающих принятый уровень надежности и долговечности конструкций;
- проведение периодического или постоянного контроля за коррозионно-механическим состоянием наиболее нагруженных сварных элементов и узлов, системы антикоррозионной защиты путем использования специализированной диагностической аппаратуры, проверки образцов-свидетелей и пр. для определения оптимального срока, «объема» и технологии освидетельствования объекта;
- осуществление мероприятий по комплексному обследованию несущей конструкции МНГС с последующими всесторонней оценкой состояния, прогнозированием остаточного ресурса безопасной эксплуатации, типа, вида и срочности проведения ремонтно-восстановительных или иных работ и т.д.;
- определение рациональной схемы и технологии утилизации или вторичного использования объекта по завершению разработки месторождения.

Совместно с ИЭС им. Е. О. Патона и другими организациями разработаны соответствующие инженерные методы и технологии, прикладные методики и модели, испытательное и диагностическое оборудование, позволяющее осуществлять комплекс перечисленных мероприятий.

**ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ГИБКИХ УПОРОВ ДЛЯ МОСТОСТРОЕНИЯ.** Д. А. Троценко, А. Е. Гончаров, В. И. Копырин, В. К. Сидоров, Б. Ф. Калашников (Гос. ун-т, ДЗАО «Курганстальмост», г. Курган, РФ). Проведены сравнительные усталостные испытания образцов гибких стержневых упоров двух типов (болтовых и сварных). Образцы представляли собой единичное болтовое или сварное соединение пластины, имитирующей плиту конструкции моста, со стержнем. Материал образцов болтовых упоров: пластина — сталь 10ХСНД-2 толщиной 32 мм, болт — сталь 40Х диаметром 22 мм. Усилие затяжки при сборке образца составляло 22400 кгс. Для сварных образцов использовали пластины из сталей 10ХСНД-2 по ГОСТ 6713-91 и 10ХСНДА-2 по ТУ 14-1-5120-92 толщиной 32, 20 и 14 мм, а стержни из стали 09Г2С-4 по ГОСТ 19281-89 диаметром 20 мм. Для изготовления сварных образцов применяли дуговой процесс, возбуждаемый между торцом стержня (специально подготовленным)

• selection of the designs, materials and technologies taking into account the need to achieve a sufficient level of mechanical, corrosion and corrosion-mechanical characteristics of the welded elements and assemblies, allowing for the effectiveness and length of effect of anticorrosion measures, as well as rationality of applying various improving post-weld processing impacts;

- development (selection) of the technology and organisation of step-by-step monitoring of the process of OSOGPC building and mounting, in order to provide the specified design and technological history of the welded joints and assemblies, effectiveness of the improving post-weld treatments, system of anticorrosion protection, etc., ensuring the specified level of the structure reliability and fatigue life;
- performance of periodical or continuous monitoring of the corrosion-mechanical condition of the most heavy-duty welded elements and assemblies of the anticorrosion system by applying specialised diagnostic equipment, checking the reference samples, etc., to determine the optimal time, scope and technology of the construction examination;
- implementing the measures on comprehensive examination of OSOGPC load-carrying structure with subsequent integrated evaluation of the condition, forecasting the safe residual life, type, kind and urgency of performance of the repair-restoration or other work, etc.;
- determination of a rational schematic and technology of salvaging or reusing the construction after completion of the field exploitation.

Appropriate engineering methods and technologies, applied procedures and models, testing and diagnostic equipment allowing the set of the above measures to be implemented, have been developed in co-operation with E.O.Paton Electric Welding Institute and other organisations.

#### CYCLIC LIFE OF FLEXIBLE ROD STOPS FOR BRIDGE CONSTRUCTION. D.A. Trotsenko, A.E. Goncharov, V.I. Kopyrin, V.K. Sidorov, B.F. Kalashnikov (State Univ., DZAO Kurganstalmost, Kurgan, Russia).

Comparative fatigue testing of samples of flexible rod stops of two types (bolted and welded) has been conducted. The samples were single bolted or welded joints of a plate simulating the plate of a bridge structure, with a rod. The material of the bolted stop samples was a plate of 10KhSND-2 steel 32 mm thick, and a bolt of 40Kh steel of 22 mm diameter. The tightening force in sample assembly was 22400 kgf. Plates of 10KhSND-2 steel to GOST 6713-91 and 10KhSNDА-2 steel to TU-14-1-5120-92 of 32, 20 and 14 mm thickness were used for welded samples, while the rods were of 09G2S-4 steel to GOST 19281-89 of 20 mm diameter. The welded samples were produced by an arc process excited between the rod tip (specially prepared) and plate surface with subsequent upsetting of the rod to a specified distance in a special unit. The welded joint zone was pro-

и поверхностью пластины с последующей осадкой стержня на заданное расстояние при помощи специализированной установки. Защиту зоны сварки осуществляли керамическим кольцом. Выбранные режимы сварки, форма торца стержня и специализированное оборудование обеспечивали получение стабильных результатов по качеству сварного соединения.

Испытания производили на усталостной машине МУП-50 по схеме консольного изгиба образца в специальном приспособлении. Образцы в приспособлении закрепляли четырьмя болтами. Плечо нагружения (18 мм) в болтовых упорах устанавливали от точки приложения нагрузки до торцевой поверхности гайки, а в сварных — до пластины упора.

Образцы упоров испытывали до разрушения при комнатной температуре. При этом коэффициент асимметрии цикла соответствовал 0,1, а частота нагружения — 660 цикл./мин. Уровни расчетных напряжений испытываемых образцов выбирали с учетом их возможного разрушения в области ограниченной долговечности. По результатам испытаний строили кривые усталости в логарифмических координатах.

Анализ кривых усталости свидетельствует, что во всем диапазоне действующих напряжений долговечность качественных сварных упоров выше, чем болтовых. С уменьшением напряжений разность долговечностей этих упоров возрастает, например при напряжении 100 МПа более чем в два раза.

Кривые усталости сварных упоров (пластины из сталей 10ХСНД-2 и 10ХСНДА-2 толщиной 32 мм) при напряжениях около 200 МПа пересекаются. При низких напряжениях наибольшей долговечностью отличаются упоры с пластиной из стали 10ХСНДА-2. С уменьшением толщины пластины упоров отмеченная закономерность сохраняется. Независимо от материала пластины с уменьшением толщины долговечность сварных упоров снижается. Однако при низких уровнях нагрузки их долговечность остается выше долговечности болтовых упоров.

По кривым усталости были спрогнозированы пределы выносливости для болтовых и сварных упоров. В качестве базового количества для болтовых упоров принимали  $0,9 \cdot 10^6$ , а для сварных —  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Предел выносливости для болтовых упоров получили равным 58 МПа; для сварных образцов с пластиной из стали 10ХСНДА-2 толщиной 32 и 14 мм — соответственно 72 и 61 МПа, а из стали 10ХСНД-2 толщиной 32 и 20 мм — соответственно 64 и 54 МПа. В образцах с пределом выносливости 54 МПа в изломе образцов обнаружено несплавление металла (5...10 %), что, очевидно, и послужило причиной снижения предела выносливости образцов этой партии. Усталостные разрушения сварных упоров во всех случаях происходят по границе сплавления с пластиной, а болтовых — по телу болта в плоскости торца гайки (при напряжениях до 200 МПа) или на расстоянии от него на 1,0...1,5 витка резьбы в глубь гайки при больших напряжениях. Разброс мест разрушений болтовых упоров обусловлен влиянием высоких остаточных напряжений, возникающих на поверхности болта от затяжки пластины гайками. При высоких уровнях нагрузки они снимаются первыми циклами нагружения, а при низких не снимаются.

В изученном диапазоне типоразмеров циклическая долговечность сварных упоров превышает таковую упоров болтовой конструкции.

tested with a ceramic ring. The selected welding modes, shape of the rod tip and specialised equipment provided stable results in terms of welded joint quality.

Testing was conducted in MUP-50 fatigue testing machine by cantilever bending of the sample in a special device. The samples were fastened in the device with four bolts. The loading arm (18 mm) in the bolted stops was set from the point of load application up to the nut face, and up to the stop plate in the welded stops.

The stop samples were tested to fracture at room temperature. The cycle asymmetry factor in this case was 0.1, and the loading frequency was 660 cycles/min. The levels of design stresses of the tested samples were selected allowing for their possible failure in the limited fatigue life region. The S-N curves were plotted in logarithmic co-ordinates after the testing results.

Analysis of S-N curves indicates that the fatigue life of sound welded stops is higher than that of the bolted stops in the entire range of the acting stresses. With lowering of stresses, the difference in the fatigue life of these stops becomes greater, for instance by more than two times at the stress of 100 MPa.

The S-N curves of welded stops (plates of 10KhSND-2 and 10KhSNDА-2 steels 32 mm thick) cross at the stresses of about 200 MPa. At low stresses, the stops with a plate of 10KhSNDА-2 steel have the longest fatigue life. The found regularity is preserved with decrease of the stop plate thickness. The welded stop fatigue life decreases with the thickness, irrespective of the plate material. At low loading levels, however, their fatigue life remains to be higher than that of the bolted stops. The S-N curves were used to forecast the endurance limits for the bolted and welded stops. The base number of loading cycles was taken to be  $0,9 \cdot 10^6$  for the bolted stops and  $2 \cdot 10^6$  for the welded stops. The endurance limit for the bolted stops was determined to be 58 MPa; for welded samples with 10KhSNDА-2 steel plate 32 and 14 mm thick, it was 72 and 61 MPa, respectively, and for those with 10KhSND-2 steel plate 32 and 20 mm thick it was 64 and 54 MPa, respectively. In samples with the endurance limit of 54 MPa, metal lack-of-fusion (approximately 5-10 %) was found in the samples fracture, this, evidently, causing the lower endurance of the samples of this batch. Fatigue fracture of welded stops in all the cases proceeds along the boundary of fusion with the plate, and that of the bolted stops runs through the bolt body in the nut face plane (at up to 200 MPa stresses) or at the distance from it equal to 1.0-1.5 thread turns into the nut body at high stresses. Scatter of the fracture sites in the bolted stops, is due to the influence of high residual stresses developing on the bolt surface from the plate tightening with nuts. At high loading levels they are relieved by the first loading cycles, and at low levels they are not relieved.

In the studied range of typesizes the cyclic fatigue life of welded stops is higher than that of the stops of bolted design.

**КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ И МКК СВАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ТИПА 18-10. Х. Тубилевич, Р. Мелехов (Политехника Ченстоховская, г. Ченстохова, Польша).**

Несмотря на многолетние исследования коррозионного растрескивания (КР) и межкристаллитной коррозии (МКК) сталей типа 18-10, до сих пор во многих производствах отмечаются случаи растрескивания сварных трубопроводов и оборудования, что создает серьезные технические и экологические проблемы. Склонность сварных соединений к МКК однозначно связана с сенсibilизацией стали, а методы ее предотвращения хорошо изучены и оговорены в технологических процессах. Что касается КР, то в каждом конкретном случае необходимо исследовать причины, а лишь потом принимать соответствующие меры для его предотвращения. Это осложнено многими факторами, прежде всего многокомпонентностью жидких или газообразных технологических сред. Можно выделить несколько основных реагентов, вызывающих КР оборудования: кислотные и горячие щелочные среды; растворы, содержащие хлорид-ионы, иногда примеси сероводорода.

Исследованы причины КР сварных трубопроводов и оборудования на ряде химических предприятий и ТЭС. Помимо анализов металлофизическими, металлографическими методами, а также определения склонности к КР и МКК образцов, вырезанных из разрушенных изделий, выполнены лабораторные исследования для выяснения причин и разработки рекомендаций по предотвращению указанных повреждений в производственных условиях. Оценку склонности к МКК производили в соответствии с общепринятыми методами, а к КР — на крупногабаритных сварных пластинах, в которых послесварочные напряжения достигали предела текучести металла даже на образцах с задаваемой степенью деформации. Образцы подвергались разным видам механической, термической обработки и ППД с целью релаксации остаточных напряжений либо изменения структуры поверхностных слоев. Рабочими средами служили растворы щелочные, хлоридные, кислотные и содержащие сероводород, а также соответствующие по составу технологическим средам, в том числе с учетом повышения коррозионно-активных компонентов в зонах застоя, упаривания раствора и т. п. База лабораторных исследований составляла не менее 3 мес. с периодическим обновлением среды либо без.

В зависимости от состава сред происходит межкристаллитное КР несенсибилизированного металла в горячих средах с повышенными pH, но при высоких послесварочных напряжениях, либо в средах, содержащих полиотионовые кислоты, когда металл сильно сенсибилизирован. Транскристаллитное КР зафиксировано при отсутствии структурных изменений в металле под воздействием сред, содержащих хлорид-ионы либо сероводород, но наиболее опасны растворы с наличием обоих реагентов. Во всех исследованных случаях не установлено прямой связи между процессами МКК и КР сталей. Использование высоколегированных сварочных проволок

**CORROSION CRACKING AND INTERCRYSTALLINE CORROSION OF WELDED EQUIPMENT MANUFACTURED FROM AUSTENITIC STEEL OF 18-10 TYPE.**

*Kh. Tubilevich, R. Melekhov (Politechnika Chensztokhowska, Chensztokhova, Poland).*

Despite the many-year investigations of corrosion cracking (CC) and intercrystalline corrosion (ICC) of 18-10 type steels, cases of cracking of welded piping and equipment are still found in many productions, this creating considerable engineering and ecological problems. Welded joint proneness to ICC is unambiguously related to steel sensitizing, and the methods of its prevention have been well-studied and specified in the technological procedures. As regards CC, in each specific case, it is necessary to study the causes, and only after that take appropriate measures for its prevention. This is complicated by many factors, primarily by the multicomponent nature of the liquid or gaseous process media. Several main reagents are recognised which cause equipment CC, namely acid and hot alkali media; solutions containing chlorine ions, and sometimes hydrogen sulphide impurities.

The causes behind CC of welded piping and equipment in a number of chemical plants and TPS have been studied. Alongside with analyses by metal-physics and metallographic methods, as well as determination of the CC and ICC susceptibility of samples cut out of destroyed items, laboratory studies have been performed to clarify the causes for and issue recommendations to prevent the above damage under the conditions of production. Evaluation of ICC susceptibility was performed in keeping with the universally recognised methods, and of CC susceptibility on large-sized welded plates in which the postwelding stresses were up to the metal yield point even on samples with the preset degree of deformation. The samples were subjected to various kinds of mechanical and heat treatment with the aim of relaxation of the residual stresses or changing the structure of the surface layers. The working media were alkali, chloride, acid and hydrogen sulphide containing solutions, as well as those corresponding to process media in composition, in particular allowing for the higher content of corrosive components in the stagnation zones, solution evaporation, etc. The duration of laboratory tests was not less than 3 months, with periodical restoration of the media or without it.

Depending on the media composition, intercrystalline CC of unsensitized metal proceeds in hot media with an increased pH value but at high post-weld stresses, or in the media containing polythionic acids when the metal is strongly sensitized. Transcrystalline CC was observed in the absence of structural changes in the metal under the impact of the media containing chlorine ions or hydrogen sulphide, but the solutions containing both reagents are the most hazardous. No direct correlation between the processes of steel ICC and CC was found in any of the cases studied. Application of high-alloyed welding wires did not turn out to be effective in terms of increasing the CC resistance of welded joints, and in some cases CC was found in the weld metal.

The most effective method of prevention CC of welded items of 18-10 type steel is austenization at the temperature not less than 1100 °C with subsequent abrupt cooling in water. For plate and large-sized structures satisfactory results were derived with preliminary deposition of the weld root pass around the entire perimeter

не оказалось действенным в отношении повышения стойкости против КР сварных соединений, а в некоторых случаях КР подвергался металл шва. Наиболее эффективный способ предотвращения КР сварных изделий из стали типа 18-10 — аустенизация при температуре не менее 1100 °С с последующим резким охлаждением в воде. Для толстолистовых и крупногабаритных конструкций удовлетворительные результаты получены в результате предварительного наложения корневого слоя шва по всему периметру изделия электродом малого диаметра и последующего наложения заполняющих и облицовочных валиков (с послойной очисткой их поверхностей) при интенсивном охлаждении металла водой со стороны корневого шва. В некоторых случаях дополнительно производили полирование поверхности зоны сварного соединения и последующее незначительное травление.

#### ОБЕРНЕНА ЗАДАЧА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ГАРТУВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ У ЛИСТАХ.

*В. Ф. Чекурін, О. З. Кравчишин (Ін-т приклад. пробл. механіки і математики ім. Я. С. Підстригача, м. Львів, Україна).* При створенні технологічних режимів зміцнюючої термообробки часто виникає необхідність використання неруйнівного контролю ступеня загартованості листових матеріалів. Задача зводиться до визначення залишкових напружень, обумовлених незворотними фізико-хімічними і механічними процесами, що виникають під час обробки. Розв'язання подібної задачі чисто розрахунковим шляхом здебільшого не забезпечує необхідної для інженерних потреб точності. З іншого боку, використання методів ультразвукового контролю дозволяє отримати дані, яких буває недостатньо для відтворення розподілу напружень по товщині. Тому важливе значення мають комбіновані методи, що використовують як результати фізичних вимірювань, так і моделі механіки, які враховують залишкові напруження.

Розглядається теоретико-експериментальний метод визначення розподілу гартувальних напружень по товщині листа. Метод базується на спільному використанні результатів акустопружних вимірювань і математичної моделі механіки тіл із залишковими напруженнями. В рамках такого підходу сформульована обернена задача неруйнівного контролю гартувальних напружень і розроблено варіаційний метод її розв'язання. Вхідними даними для оберненої задачі є результати акустичних вимірювань, отримані для різних віддалей від краю листа. Ефективність запропонованого методу ілюструється результатами проведених числових експериментів.

**РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.** *О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, В. М. Михайлишин (Держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна), О. С. Письменний (Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, м. Київ, Україна).* В процесі індукційного наплавлення робочої кромки металевих конструкцій (тонких сталевих дисків суцільної або зубчастої форми) стійкими до спрацювання порошкоподібними твердими сплавами в готівій деталі виникають залишкові напруження і пе-

of the item with a small-diameter electrode and subsequent deposition of the filling and facing beads (with layer-by-layer cleaning of their surfaces) at intensive water cooling of the metal from the root weld side. Polishing of the welded joint zone surface and subsequent slight etching were further performed in some cases.

#### INVERSE PROBLEM OF ULTRASONIC CONTROL OF HARDENING STRESSES IN SHEETS. *V.F. Chekurin, O.Z. Kravchishin (Ya.S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, Lviv, Ukraine).*

In development of technological modes of strengthening heat treatment, it is often necessary to perform non-destructive testing of the degree of sheet material hardening. The problem is reduced to determination of residual stresses due to irreversible physical-chemical and mechanical processes developing during treatment. Solving such a problem by a purely numerical method as a rule does not provide the accuracy required for engineering purposes. On the other hand, ultrasonic testing methods yield data which are sometimes insufficient for reproduction of the stresses distribution across the thickness. Therefore, combined methods using both the results of physical measurements and mechanics models allowing for residual stresses, are of great importance.

A theoretical-experimental method of determination of hardening stresses distribution across the sheet thickness is considered. The method is based on simultaneous use of the results of acousto-elastic stress measurements and a mathematical model of mechanics of bodies with residual stresses. An inverse problem of non-destructive testing of hardening stresses has been defined and a variational method of its solution has been developed in terms of such an approach. The input data for the inverse problem are the acoustic measurement results derived for different distances from the sheet edge. The effectiveness of the proposed method is illustrated by the results of the conducted numerical experiments.

#### CONTROL OF RESIDUAL DISPLACEMENTS IN INDUCTION SURFACING OF THIN METAL STRUCTURES. *O.M. Shablii, Ch.V. Pulka, V.M. Mikhailishin (I. Pulyui State Techn. Univ., Ternopil, Ukraine), O.S. Pismenny (The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).*

During induction surfacing of the working edge of metal structures (thin steel discs of a continuous or toothed shape) with wear-resistant powderlike hard alloys, residual stresses and displacements are induced in the finished part, which result in the change of the part structural dimensions. Residual displacements de-

переміщення, які призводять до зміни конструктивних розмірів деталі. Залишкові переміщення залежать від геометричних розмірів диска, наплавленого шару та фізико-механічних характеристик матеріалів диска та наплавленого металу. З метою отримання деталей із заданими характеристиками виникає необхідність розробки математичної моделі протікання всіх стадій процесу наплавлення та охолодження. Напруження та переміщення зумовлені різними причинами, найважливіша з яких полягає у тому, що матеріали основного і наплавленого шарів мають різні механічні та теплофізичні властивості і перш за все коефіцієнти температурного розширення  $\alpha_T$ . Проблемі теоретичного визначення залишкових деформацій, переміщень та напружень, що виникають внаслідок наплавлення кромок тонких пластин або зварювання, присвячено цілий ряд досліджень. Проведені експерименти по наплавленню дисків, виготовлених із сталі Ст3 і наплавлених сплавом ПГ-С1. Дослідження показали, що прогини дисків досить добре узгоджуються з прогинами, отриманими аналітично-числовим методом. Максимальне відхилення прогину складає до 10 %. На основі одержаних результатів можливе управління залишковими переміщеннями (прогинами) ножів-гичкорізів з метою одержання виробів з заданими експлуатаційними характеристиками (за рахунок різних значень градієнтів температур по радіусу диска).

**ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ ОКРИХЧЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПАЯНИХ СОТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ.** В. В. Широков (Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка, м. Львів, Україна). Після аргоно-дугового зварювання попередньо паяних сталевих сотових елементів конструкцій 60...70 % з них мали незадовільну якість внаслідок утворення тріщин у металі зони термічного впливу та в наплавленому металі. Враховуючи, що для виготовлення сотових елементів підвищеної жорсткості застосовують гетерофазні мартенситно-феритні сталі, а основним технологічним процесом є паяння самофлюсівними припоями на основі міді (температура плавлення ~ 950 °C), було припущено, що розтріскування зварних з'єднань зумовлено адсорбційним впливом рідкої міді. Досліджувалися чотири марки сталі, відмінні за хімічним складом і вмістом  $\delta$ -фериту. Зразки для випробувань типу подвійної лопатки перерізом 1×3 мм з катаного листа товщиною до 1 мм виготовляли таким чином, щоб довша вісь зразка збігалася з напрямом прокату. Після шліфування в шаблонах провадили термічну обробку готових зразків (аустенізація з попереднім лудінням або без нього при 1030 °C, 0,5 год і подальшим відпусканням при 510 °C, 2 год. Лудили в камері, заповненій спектрально-чистим аргоном. Основні складові припою такі (мас. доля, %): Mn — 22...26, Ni — 5...6; Fe — 0,8...1,2; Li — 0,15...0,28, Si — до 0,5; Cu — решта. На основі аналізу результатів комплексних металофізичних досліджень та механічних (статичний розтяг, малоциклова втома та ін.) випробувань встановлено схильність мартенситно-феритних, хромо-нікелевих сталей марки ВНС до окрихчення припоєм на основі міді (ВПр2) при температурах, близьких або вищих  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -перетворення. Температурний

pend on the geometrical dimensions of the disc, deposited layer and physical-mechanical characteristics of the disc materials and the deposited metal. Production of parts with the specified characteristics necessitates development of a mathematical model of running of all the stages of the surfacing and cooling process.

Stresses and displacements arise from various causes, the most important of which consists in that the materials of the base and the deposited layers have different mechanical and thermal-physical properties, and, first of all, thermal expansion factors.

A number of studies were devoted to the problem of theoretical determination of residual deformations, displacements and stresses resulting from surfacing or welding of thin plate edges.

Experiments have been conducted on surfacing of St.3 steel discs by PG-S1 alloy. Investigations showed that the discs deflection agrees quite well with the deflection values derived by the analytical-numerical method. The maximal deviation of deflection value is up to 10 %.

The derived results permit controlling the residual displacements (deflections) of haulm cutters in order to make products with the specified service properties (at the expense of different temperature gradients along the disc radius).

#### HIGH-TEMPERATURE EMBRITTLEMENT OF WELDED STRUCTURES MADE OF BRAZED HONEYCOMB ELEMENTS. V.V. Shirokov (H.V. Karpenko Phys.-Mech. Inst., Lviv, Ukraine).

After argon-arc welding of pre-brazed steel honeycomb structural elements, 60 to 70 % of them have an unacceptable quality due to cracking in the heat-affected zone metal and the deposited metal. Considering that heterophase martensitic-ferritic steels are used for fabrication of honeycomb elements of a greater rigidity, and the main technological process is brazing with self-fluxing copper-base braze alloys (melting temperature of ~ 950 °C), it was assumed that cracking of welded joints is due to adsorption influence of molten copper.

Four steel grades were studied which differed in their composition and  $\delta$ -ferrite content. Dumb-bell test samples with 1×3 mm cross-section of up to 1 mm rolled sheet were made so that the sample longer axis coincided with the rolling direction. After polishing in the templates, heat treatment of the finished samples was performed (austenization with prior tinning or without it at 1030 °C, 0.5 h and subsequent tempering at 510 °C, 2 h). Tinning was performed in a chamber filled with spectral-purity argon. The main components of the braze alloy were as follows: (wt. %): Mn — 22–26, Ni — 5–6, Fe — 0.8–1.2; Li — 0.15–0.28; Si up to 0.5; Cu being the balance.

The susceptibility of martensitic-ferritic and chromium-nickel steels of VNS grade to embrittlement by a copper-base braze alloy (VPr2) at the temperatures close to or higher than  $\alpha \leftrightarrow \beta$  transformation was established proceeding from analysis of the results of comprehensive metal physics investigations and mechanical (static tension, low-cycle fatigue, etc.) tests. The critical brit-

інтервал окрихнення залежить від вмісту  $\gamma$ -фериту в сталях і його межі можуть незначно регулюватися шляхом відповідного легування.

З підвищенням вмісту  $\delta$ -фериту температура початку окрихнення дещо збільшується, а потім знижується. Встановлений ефект високотемпературного (вище 950 °C) окрихнення сталей рідкометалевим розплавом має подібні і ряд відмінних ознак від звичайного рідкометалевого окрихнення (РМО). Подібність полягає в інтеркристалітному характері руйнування, в збереженні крихкого характеру руйнування при значних деформаціях до руйнування і відновленні пластичності при підвищенні температури; в пластифікації матеріалу при температурах, дещо менших за температури, в діапазоні яких спостерігається окрихнення. Відмінності полягають у високих абсолютних значеннях температури РМО, в зниженні пластичності під дією розплаву при загальному в'язкому характері руйнування сталей.

При температурах 950...1100 °C зварний метал без припою більш пластичний, ніж суцільний. Однак у всіх випадках окрихнення припоєм зварних зразків відбувається при більш низьких температурах, порівняно з незварними.

Так, найнижча температура різкого падіння пластичності зварних зразків складала 950 °C, а для суцільних — 975 °C. Тобто внаслідок зварювання температурний інтервал окрихнення припоєм, який так чи інакше потрапляє в зону зварювання, розширюється в низькотемпературну область. Встановлено, що інтенсивність окрихнення в температурному діапазоні механічних випробувань (20...1200 °C) не залежить від того, на якому етапі припій потрапляє в зону зварювання.

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА.** Б. С. Шульгин, В. А. Дегтярев, В. В. Матвеев (Ин-т проблем прочности, г. Киев, Украина). Проведенные в Институте проблем прочности НАН Украины исследования показали, что сопротивление усталости сварных соединений низколегированных сталей в условиях многоциклового ударного нагружения при низкой климатической температуре может быть, в отличие от основного металла, существенно меньше, чем в стандартных условиях, т.е. в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре. Установлено, что основной причиной зафиксированного явления служат различные дефекты сварного шва, в том числе поры и включения размером от 10 мкм и больше.

Исследовали влияние технологии сварки, свойств основного металла и некоторых наиболее распространенных технологий упрочнения сварного шва на сопротивление усталости сварных соединений при ударном нагружении и низкой температуре. Испытания образцов при повторном ударном нагружении производили на копре типа ДСО-1 с частотой 10 Гц в режиме заданной энергии удара, а при гармоническом (синусоидальном) нагружении — на установке типа ДСО-2 с такой же частотой нагружения в режиме заданной амплитуды деформации. Действующие напряжения определяли тензометрическим способом.

Влияние технологии сварки исследовали на примере стыкового соединения стали 12ГНЗМФАЮДР со снятой

плотностью температуры зависит от содержания  $\gamma$ -феррита в сталях и его пределы могут быть слегка изменены соответствующим легированием.

С увеличением содержания  $\delta$ -феррита температура начала охрупчивания становится несколько выше и затем снижается. Найден эффект высокой температуры (выше 950 °C) охрупчивания сталей жидким металлом имеет сходные и ряд отличительных признаков по сравнению с обычным жидким металлом охрупчиванием (ММЕ). Подобие состоит в межкристаллической природе разрушения, сохранении хрупкого характера разрушения при значительных деформациях до разрушения и восстановления пластичности с повышением температуры; в материальной пластификации при температурах, несколько ниже температур, в диапазоне которых охрупчивание обнаружено. Различия лежат в высоких абсолютных значениях температуры РМО, в снижении пластичности под действием расплава при общем вязком характере разрушения сталей.

При температурах 950 до 1100 °C сварный металл без припоя более пластичен, чем монолитный металл. Однако во всех случаях охрупчивания припоем сварных образцов происходит при более низких температурах, по сравнению с незварными.

Таким образом, температура резкого падения пластичности сварных образцов составляла 950 °C, а для монолитных — 975 °C. То есть вследствие сварки температурный интервал охрупчивания припоем, который так или иначе попадает в зону сварки, расширяется в область низких температур. Установлено, что интенсивность охрупчивания в температурном диапазоне механических испытаний (20–1200 °C) не зависит от того, на каком этапе припоя попадает в зону сварки.

#### **METHODS OF IMPROVEMENT OF FATIGUE RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF METAL STRUCTURES USED UNDER THE CONDITIONS OF EXTREME NORTH.**

В. С. Шульгин, В. А. Дегтярев, В. В. Матвеев (Институт проблем прочности, Киев, Украина). Исследования, проведенные в Институте проблем прочности НАН Украины, показали, что сопротивление усталости сварных соединений низколегированных сталей в условиях многоциклового ударного нагружения при низкой климатической температуре может быть, в отличие от основного металла, существенно ниже, чем в стандартных условиях, т.е. в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре. Установлено, что основной причиной зафиксированного явления служат различные дефекты сварного шва, в том числе поры и включения размером от 10 мкм и больше.

Влияние технологии сварки, свойств основного металла и некоторых наиболее распространенных технологий упрочнения сварного шва на сопротивление усталости сварных соединений при ударном нагружении и низкой температуре исследовали. Испытания образцов при повторном ударном нагружении производили на копре типа ДСО-1 с частотой 10 Гц в режиме заданной энергии удара, а при гармоническом (синусоидальном) нагружении — на установке типа ДСО-2 с такой же частотой нагружения в режиме заданной амплитуды деформации. Действующие напряжения определяли тензометрическим способом.

Влияние технологии сварки исследовали на примере стыкового соединения стали 12ГНЗМФАЮДР со снятой

выпуклостью шва. Образцы вырезали из пластин толщиной 16 мм, сваренных в углекислом газе: одна пластина — проволокой ПП АН-57 диаметром 2,2 мм, а другая — проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм. После сварки обе пластины подвергали отпуску при температуре 600 °С. Одну часть образцов, изготовленных из каждой пластины, испытывали при ударном нагружении с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0$  и температуре -60 °С, другую — при гармоническом нагружении с  $R = 0$  и комнатной температуре. Как показали испытания, применение проволоки марки ПП АН-57, во-первых, увеличивает предел выносливости стыкового соединения рассматриваемой стали как в стандартных условиях, так и при ударном нагружении и низкой температуре. Во-вторых, в случае особо высокого качества металла шва отсутствует отрицательное влияние ударного нагружения. Образцы из стали 12ГН2МФАЮ со стыковым соединением, выполненным механизированной сваркой в углекислом газе, вырезали из пластин толщиной 24 мм. Шов одной пластины был подвергнут аргоно-дуговой обработке, шов другой оставлен в исходном состоянии. Испытания образцов на усталость производили при  $R = 0,5$ . В одной партии плоских образцов из стали 09Г2С с поперечным сечением 24×80 мм и с поперечным ребром угловой шов подвергли поверхностному ультразвуковому наклепу, а в другой — оставили в исходном состоянии. Испытания на усталость производили при  $R = 0,56$ . Полученные результаты испытаний сварных образцов показали, что при необработанных швах влияние ударного нагружения при низкой температуре весьма существенно, а среди рассмотренных способов обработки швов ультразвуковой поверхностный наклеп является наиболее эффективным способом повышения сопротивления усталости сварных соединений в условиях ударного нагружения и низкой температуры. Увеличение предела выносливости (на базе  $1 \cdot 10^6$  циклов) при выбранном режиме ультразвукового наклепа составило 42 против 33 % при аргоно-дуговой обработке.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.** В. Н. Шимановский, В. Н. Гордеев (УкрНИИпроектальконструкция, г. Киев, Украина). Сварка как технологический процесс соединения элементов конструкций позволяет перейти к разработке новых конструктивных форм элементов и систем зданий, а также сооружений из них.

Рассматривается влияние той или иной технологии сварки на поперечные сечения элементов и узлов различных конструкций. Показана их эволюция на протяжении последних 20...30 лет. Приводятся данные о снижении металлоемкости за счет применения тонкостенных холодногнутых замкнутых элементов различного профиля, создание которых стало реальным именно благодаря сварке.

Особенно большое внимание уделяется конструкциям с начальными внутренними напряжениями, противоположными по знаку напряжениям, возникающим от эксплуатационных нагрузок.

Показана возможность разработки таких сочетаний сталей, конструкций и режимов сварки, которые позволили бы использовать сварочные напряжения для активного регулирования напряженно-деформированного состояния конструкций.

with Sv-08G2S wire of 2.0 mm diameter. After welding both plates were tempered at the temperature of 600 °C. One part of the samples made of each plate was tested at impact loading with cycle asymmetry factor  $R = 0$  and temperature of -60 °C, the other part at harmonic loading at  $R = 0$  and room temperature.

As shown by testing, application of PP AN-57 wire, first of all, increases the endurance limit of the butt joint of the steel being considered both under the standard conditions and under the impact loading and low temperature. Secondly, in the case of especially high quality of the weld metal, the negative influence of impact loading is not manifested.

Samples of 12GN2MFAYu steel with a butt joint made by mechanised CO<sub>2</sub> welding, were cut out of 24 mm plates. The weld on one plate was subjected to argon-arc treatment, the weld on the other plate was left in the initial condition. Fatigue testing of the samples was conducted at  $R = 0.5$ . In one batch of flat samples of 09G2S steel with 24×80 mm cross-section and a transverse fin, the fillet weld was subjected to surface ultrasonic work hardening, and in the other it was left in the initial condition. Fatigue testing was conducted at  $R = 0.56$ . The derived results of welded samples testing showed that with untreated welds the influence of impact loading at low temperature is quite significant, and among the considered methods of weld treatment, ultrasonic work hardening of the surface is the most effective method of improvement of welded joint fatigue resistance under the conditions of impact loading and low temperature. Increase of the endurance limit (on  $1 \cdot 10^6$  cycle base) was 42 % with the selected mode of ultrasonic work hardening compared to 33 % after argon-arc treatment.

**IMPROVEMENT OF THE ELEMENTS OF WELDED STRUCTURES OF BUILDINGS AND ENGINEERING FACILITIES.** V.N.Shimanovsky, V.N.Gordeev, (UkrNIIProektsalkonstruktsia, Kiev, Ukraine). Welding as a technology of joining structural elements permits development of new designs of elements and systems of buildings, as well as constructions made of them.

The influence of a particular welding technology on the cross-sections of elements and components of various structures is considered. Their evolution over the last 20 to 30 years is shown. The data are given on metal content with application of thin-walled cold-bent closed elements of various profiles, the development of which became possible only due to welding.

An especially great attention is given to structures with initial inner stresses opposite in sign to the stresses developing under service loads.

A possibility is shown of development of such combinations of steels, structures and welding modes which would allow the welding stresses to be used for active control of the stressed-strained state of structures.

Alongside with the structural elements, various systems of buildings and constructions are considered which during mounting develop stresses opposite in sign to those induced by service loads. Taking as an example

Наряду с элементами конструкций рассматриваются различные системы зданий и сооружений, в которых в процессе монтажа создаются напряжения, обратные по знаку напряжениям от эксплуатационных нагрузок. На примере традиционного решения одного из видов инженерных сооружений со сварными соединениями (резервуаров) приводятся новые, позволяющие существенно снизить металлоемкость и стоимость строительства.

**ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ В РАСЧЕТАХ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ.** В. П. Королев, Р. Г. Толстяков (Донбасс. гос. акад. стр-ва и архит., г. Макеевка, Украина). Дан анализ существующей нормативной базы проектирования противокоррозионной защиты стальных конструкций зданий и сооружений. В качестве количественного критерия оценки эффективности мер по защите от коррозии предлагается использовать коэффициент надежности противокоррозионной защиты. Определение коэффициента надежности производится в соответствии с подходами методики предельных состояний в зависимости от степени агрессивности воздействия, конструктивных решений и типа защитных покрытий.

Оценка показателей надежности строительных металлоконструкций связана с использованием разработанного аналитического аппарата, включающего обоснование нормативных характеристик коррозионных воздействий, выбор расчетных моделей и ситуаций при выполнении расчета на коррозионную стойкость и долговечность.

Сформулированный методический подход к расчету строительных металлоконструкций на коррозионную стойкость и долговечность реализован при построении экспертной системы, включающей требования строительных норм и правил, государственных стандартов в области коррозии и защиты металлов. В соответствии с современными представлениями о проблеме надежности строительных объектов, определение основных расчетных параметров осуществляется путем описания физических явлений, которые входят в отдельные составляющие системы конструкция-нагрузка-среда.

**СНИЖЕНИЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.** В. И. Столбов (Политех. ин-т, г. Тольятти, РФ). Известно, что 80 % аварий на магистральных трубопроводах происходит в результате их разрушения, причиной которого является гидроудар, возникающий при колебаниях расхода или резонанса волн. Поэтому разработка методов ослабления действия гидроудара приобретает важное значение в обеспечении живучести трубопроводов. Разработанная математическая модель гидроудара в трубопроводах с эластичной вставкой позволила проинтегрировать дифференциальные уравнения неустановившегося движения жидкости в трубах и проанализировать влияние ряда факторов на демпфирующие свойства упругой оболочки с учетом сглаживания фронта ударной волны, вызванного податливостью внутреннего трубопровода. Расчеты показали ослабление гидроудара для различных ре-

the traditional solution for one of the kinds of engineering constructions with welded joints (tanks), new solutions are discussed which allow an essential reduction of the metal content and cost of construction.

**PRINCIPLES OF RATING THE CHARACTERISTICS OF CORROSION STRENGTH AND FATIGUE LIFE DURING CALCULATION BY LIMITING STATES.** V.P. Korolyov, R.G. Tolstyakov (Donbass State Academy of Construction and Architecture, Makeevka, Ukraine).

The existing codes and specifications for designing the corrosion protection of steel structures of the buildings and constructions are analysed. It is proposed to use the coefficient of corrosion protection reliability as the quantitative criterion of evaluation of the effectiveness of the corrosion protection measures. The coefficient of reliability is determined in keeping with the approaches of limiting states procedure, depending on the degree of the impact aggressiveness, design solutions and protective coating type.

Evaluation of the reliability characteristics of the building metal structures involves the use of the developed analytical procedure which includes substantiation of the rated characteristics of the corrosive attack, selection of calculation models and situations in corrosion resistance and fatigue life analysis.

The defined methodological approach to building metal structures design for corrosion resistance and fatigue life was implemented in an expert system including the requirements of the building codes and regulations, and state standards on corrosion and protection of metals. In keeping with the current concepts of reliability of construction facilities, the main design parameters are defined by description of the physical phenomena which are inherent in individual components of the structure-load-environment system.

**REDUCTION OF EXPLOSION HAZARD OF WELDED PIPELINES.** V.I. Stolbov (Polytechnic Institute, Tolyatti, Russia).

It is known that 80 % of accidents in the main pipelines occur due to their fracture because of a hydraulic impact created by flow rate variation or wave resonance. Therefore, searching for the methods to weaken the hydraulic impact becomes very important in provision of pipeline viability.

The developed mathematical model of hydraulic impact in pipelines with an elastic insert permitted integration of the differential equations of unsteady flow of liquid in the pipes and analysis of the influence of a number of factors on the damping properties of an elastic shell allowing for smoothing of the shock wave front caused by inner pipeline compliance. Calculations demonstrated weakening of the hydraulic impact for various modes of operation of pipelines with an elastic insert. The dependence of the hydraulic impact amplitude on the pro-

жимов эксплуатации трубопроводов с эластичной вставкой. Определена зависимость амплитуды гидроудара от свойств транспортируемой жидкости, материала несущего трубопровода и т. п.

Разработано конструктивное решение по созданию трубопроводов с дополнительными элементами податливости стенок, которое, согласно расчетам по составленной математической модели, ослабляет гидроудар на порядок за счет действия демпфирующей среды и сглаживания фронта ударной волны, а в ряде случаев обеспечивает двадцатикратное снижение амплитуды гидроудара. При этом с целью увеличения ресурса трубопроводов демпфирующая среда выбирается инертной по отношению к материалу трубопровода.

В настоящее время осуществляются работы по выбору оптимальных конструкций трубопроводов различного назначения с дополнительными элементами податливости стенок, в том числе для трубопроводов топливных систем двигателей.

Предлагаемое решение значительно облегчает мониторинг трубопроводов и снижает экологический ущерб, вызванный разливом нефти и взрывами транспортируемого газа. Ожидаемое повышение ресурса магистральных трубопроводов за счет применения рекомендуемого конструктивного решения составляет 600...800 %.

**СВАРКА ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.** А. И. Гедрович, А. Б. Жидков (Вост.-укр. гос. ун-т, г. Луганск, Украина). Одной из принципиальных возможностей уменьшения или устранения сварочных деформаций и напряжений в тонколистовых конструкциях является сварка с искусственным охлаждением зоны термического влияния шва. Любой способ сварки, при котором осуществляется интенсификация теплоотвода от изделия, может считаться способом сварки с искусственным теплоотводом.

К теплоотводящим устройствам и способам относятся медные подкладки; ползуны; приспособления, обдувающие поверхность газами или омывающие водой; системы, использующие эффект капиллярности; применение пористых, волокнистых материалов, теплоотводящих паст и кристаллических теплопоглотителей, а также низкотемпературных сред, например жидкого азота.

Для определения наиболее эффективных и технологичных способов принудительного охлаждения выполнен их сравнительный анализ. Оценку размеров активной зоны при сварке осуществляли методом полос текучести с использованием цифровой фотокамеры.

Эксперименты производили на образцах из стали ВСтЗпс размером 2Х300Х400 мм. Перед сваркой образцы отжигали для снятия внутренних напряжений. Наплавку валика выполняли по центру листа ручной дуговой сваркой покрытыми электродами и автоматической сваркой в  $\text{CO}_2$ .

Сварку образцов встык выполняли ручной дуговой сваркой на тех же режимах. Теплоотвод осуществляли при охлаждении одной стороны от сварного шва или локально на ограниченном участке.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- охлаждение с использованием свободной воды не-

perties of the transported liquid, load-carrying pipeline material, etc., has also been determined.

A design solution has been developed which consists in making pipelines with additional elements of the wall compliance, which, according to calculations by the constructed mathematical model, weakens the hydraulic impact by an order of magnitude due to the action of the damping medium and smoothing of the shock wave front, and in a number of cases provides a 20-fold reduction of the hydraulic impact amplitude. In this case, a damping medium inert relative to the pipeline material, is selected in order to extend the pipeline life.

Work is currently in progress to select the optimal pipeline designs for various applications with additional elements of the wall compliance, including the piping of engine fuel systems. The proposed solution greatly facilitates pipeline monitoring and reduces environmental damage from oil spills and transported gas explosions. The anticipated extension of the life of the main pipelines due to application of the recommended design solution, is 600 to 800 %.

#### WELDING OF SHEET STRUCTURES WITH A FORCED COOLING. A. I. Gedrovich, A. B. Zhidkov (East-Ukrainian State Univ., Lugansk, Ukraine).

One of the principal possibilities of reduction or elimination of welding stresses and strains is welding with artificial cooling of the weld HAZ. Any welding process with an intensification of heat removal from the item, can be regarded as the welding process with artificial heat removal.

Heat-removing devices and methods include copper backings; shoes; devices blowing the surface with gases or washing it with water; systems based on the capillarity effect; application of porous, fibrous materials, heat-removing pastes and crystalline heat absorbers, as well as low-temperature media, for instance liquid nitrogen. In order to determine the most effective and adaptable to fabrication methods of forced cooling, their comparative analysis was performed. The dimensions of the active zone in welding were evaluated by the flow line method with a digital photo camera.

Experiments were performed on 2Х300Х400 mm samples of VSt.3ps steel. Prior to welding the samples were annealed to relieve the inner stresses. The bead was deposited in the sheet center with coated-electrode manual arc welding and automatic  $\text{CO}_2$  welding.

Manual butt welding of samples was performed in the same modes. The heat was removed by cooling from one side of the weld or locally in a limited area.

The performed investigations led to the following conclusions:

- cooling with free flowing water is not adaptable to fabrication, as local metal deformations in welding do not permit a reliable sealing of the water tank. Therefore, use of water cooling of the lower side of the welded butt hinders the removal of air bubbles from under the surface being cooled;
- application of crystalline heat-absorbing rods is suitable for automatic welding but complex in the manual and mechanised welding;

технологично, поскольку локальные деформации металла при сварке не позволяют надежно герметизировать емкость с водой. Поэтому использование охлаждения водой нижней стороны сварного стыка затрудняет удаление воздушных пузырей из под охлаждаемой поверхности;

- применение кристаллических теплопоглощающих стержней технологично при автоматической сварке, но сложно при ручной и механизированной;
- применение медной подкладки является наиболее технологичным и при использовании промежуточного слоя может быть рекомендовано для практического внедрения;
- применение пористых материалов (стекловаты), пропитанных водой, дает высокую эффективность теплоотвода и технологично, но для практики необходимы более детальные исследования с целью выработки оптимальных параметров охлаждения;
- охлаждение обдувом воздухом имеет низкую эффективность и в качестве способа для снижения сварочных деформаций и напряжений использовано быть не может.

#### ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПАРОПРОВОДНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 15X1M1Ф ПУТЕМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.

В. Ю. Атаев (Минэнерго РУЗ, г. Ташкент, Узбекистан), А. А. Мухаммедов, М. А. Абралов (Гос. техн. ун-т, г. Ташкент, Узбекистан). В состоянии поставки металл паропроводных труб из стали 15X1M1Ф должен иметь структуру с содержанием бейнитной составляющей не менее 20 %. Это обеспечивает достаточный уровень показателей механических свойств как при комнатной, так и при рабочей температурах. После длительной эксплуатации в условиях высоких давлений и температур в металле паропроводных труб зафиксированы значительные изменения структуры и свойств. Происходит коагуляция и сфероидизация карбидных частиц, обеднение феррита легирующими элементами, что в свою очередь приводит к снижению жаропрочности и ускорению ползучести. Цель восстановительной технической обработки — путем повторной фазовой перекристаллизации придать структуре и свойствам стали исходное состояние. Для паропроводных труб из стали 15X1M1Ф рекомендуются различные режимы восстановительной термической обработки. Первая ее ступень включает нормализацию с температур нагрева в довольно широком интервале (1000...1070 °C). Каких-либо рекомендаций относительно скорости охлаждения при нормализации не приводится. Вторая ступень восстановительной термической обработки включает отпуск при температуре 740...760 °C в течение 10 ч с целью дисперсионного упрочнения матрицы сплава (феррита) за счет выделения из твердого раствора карбидов ванадия. Очевидно, что в зависимости от массы изделия, толщины стенки трубы и температуры окружающей среды реализуемая скорость охлаждения будет сильно отличаться. Скорость охлаждения при нормализации непосредственно сказывается на степени легированности твердого раствора  $\alpha$ -фазы и на степени дисперсионного твердения при отпуске, что особенно важно для случаев индукционного нагрева, когда охлаждаемая часть трубы имеет тепловой подпор со стороны нагреваемой части.

- application of the copper backing is best adaptable to fabrication and can be recommended for practical introduction with the use of the intermediate layer;
- application of porous material (glass wool) impregnated with water, provides a high efficiency of heat removal and is adaptable to fabrication, but more detailed investigations are required for practical purposes in order to optimise the cooling parameters;
- cooling by blowing with air is ineffective and cannot be used as the method of lowering the welding stresses and strains.

#### INCREASE IN LIFE OF STEAM PIPING OF 15Kh1M1F STEEL RECOVERED BY HEAT TREATMENT.

V. Yu. Ataev (Minenergo Ruz, Tashkent, Uzbekistan), A. A. Mukhammedov, M. A. Abralov (State Techn. Univ., Tashkent, Uzbekistan). In as-delivered condition the metal of steam piping of 15Kh1M1F steel should have the structure with not less than 20 % fraction of the bainite component. This provides a sufficient level of the mechanical property values both at the room and working temperatures.

Significant changes in the steam piping metal were registered after long-term operation at high pressures and temperatures. Coagulation and spheroidizing of carbide particles and ferrite depletion in alloying elements take place, this in its turn leading to lowering of high-temperature strength and increase of the creep rate.

The purpose of recovering treatment by repeated phase recrystallization is to restore the initial condition of the steel structure and properties. Various modes of recovering heat treatment are recommended for steam piping of 15Kh1M1F steel. Its first stage consists in normalizing from the heating temperatures in a rather broad temperature range (1000–1070 °C). No recommendations on the cooling rate in normalizing are given. The second stage of recovering heat treatment includes tempering at the temperature of 740–760 °C for 10 h, which provides dispersion-hardening of the alloy matrix (ferrite) at the expense of vanadium carbides precipitation from the solid solution. It is obvious that the achievable cooling rate will differ greatly depending on the item weight, pipe wall thickness and environmental temperature.

The cooling rate in normalizing has a direct influence on the degree of alloying of the  $\alpha$ -phase solid solution and on the degree of dispersion hardening in tempering, this being especially important for the cases of induction heating when the cooled part of the pipe is exposed to the heat coming from the side of the heated part.

The enterprises of Minenergo and other ministries of Uzbekistan Republic do not have at their disposal any large-sized heating devices with a precise distribution of temperatures over all the heating zones. In this connection the recovering heat treatment of steam piping

Предприятия Минэнерго и других министерств республики Узбекистан не располагают крупногабаритными нагревательными устройствами с точным распределением температур по всем зонам нагрева. В связи с этим при восстановительной термической обработке паропроводных труб приходилось ориентироваться не на печной нагрев, а на индукционный. Недостатком индукционного нагрева является наличие теплового подпора со стороны нагреваемой части трубы. При индукционном нагреве при проведении нормализации трубы  $\varnothing 45 \times 245$  мм скорость охлаждения нагретой части трубы на воздухе составляет около  $9^\circ\text{C}/\text{мин}$ , при вентиляторном охлаждении — около  $15^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Следовало установить оптимальную температуру нагрева и минимально допустимую скорость охлаждения при формировании у стали марки 15X1M1F оптимальной структуры. Определено, что для получения таких структур после восстановительной термической обработки температура нагрева под нормализацию должна составлять  $1100^\circ\text{C}$ . В этом случае происходит наиболее полная гомогенизация аустенита, что обеспечивает его более высокую устойчивость к распаду при охлаждении.

При нормализации скорость охлаждения должна быть достаточно высокой для обеспечения структуры зернистого бейнита или ферритно-бейнитной смеси (не менее 20 % бейнитной составляющей) согласно ТУ 14-3-460-75.

Таким образом, при скорости охлаждения  $15^\circ\text{C}/\text{мин}$  достигается структура крайнего балла 5, после которой идут уже браковочные структуры.

Разная скорость охлаждения при нормализации стали марки 15X1M1F должна влиять на степень легированности твердого раствора  $\alpha$ -фазы и, следовательно, на процесс дисперсионного твердения при отпуске. Были проведены специальные эксперименты по изучению влияния скорости охлаждения при нормализации, температуры и времени отпуска на твердость стали. Выявлены пики дисперсионного твердения при температуре отпуска  $550$  и  $600^\circ\text{C}$ .

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ОТВЕТСТВЕННЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ.** А. Ю. Бондаренко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Прогнозирование индивидуального ресурса сварных конструкций включает целый комплекс задач: оценку текущего технического состояния объекта; прогнозирование развития состояния на ближайшее будущее; выдачу на основе этого прогноза рекомендаций об оптимальном остаточном сроке эксплуатации (до списания данного объекта или сроке очередного ремонта). В задачу прогнозирования входит также оценка вероятности наступления отказов с целью их предупреждения. При решении вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации конкретного технического объекта группа экспертов использует математическую формализацию интуитивных представлений об остаточном ресурсе. Основой для прогнозирования является информация по каждому конкретному техническому объекту (трубопроводам, сосудам и другим объектам повышенной опасности):

- данные текущего (оперативного) периодического

had to be oriented not to the furnace, but to induction heating. The disadvantage of induction heating is the heat contribution from the side of the heated part of the pipe. In induction heating during normalizing of  $\varnothing 45 \times 245$  mm pipe, the rate of cooling of the pipe heated part in air is about  $9^\circ\text{C}/\text{min}$  and about  $15^\circ\text{C}/\text{min}$  with fan cooling. The optimal heating temperature and minimal admissible cooling rate in formation of the optimal structure of 15Kh1M1F grade steel were determined.

It is established that in order to produce such structures after recovering heat treatment the temperature of heating for normalizing should be  $1100^\circ\text{C}$ . In this case the austenite homogenizing is the most complete, thus providing its higher resistance to decomposition in cooling. The cooling rate in normalizing should be high enough to provide the structure of granular bainite or ferrite-bainite mixture (not less than 20 % of bainite component) according to TU 14-3-460-75.

Thus, at the cooling rate of  $15^\circ\text{C}/\text{min}$  the structure with the extreme point 5 is achieved, which is already followed by rejected structures. The different cooling rate in normalizing of 15Kh1M1F grade steel should influence the degree of alloying of  $\alpha$ -phase solid solution and, therefore, the process of dispersion hardening in tempering. Special experiments were conducted to study the influence of the cooling rate in normalizing, temperature and time of tempering on steel hardness. Dispersion hardening peaks were found at the tempering temperature of  $550$  and  $600^\circ\text{C}$ .

#### PREDICTION OF LIFE OF CRITICAL WELDED STRUCTURES AT THE STAGE OF SERVICE.

A. Yu. Bondarenko (The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine). Forecasting the individual life of welded structures includes a whole range of tasks, namely assessment of the current technical condition of the object; forecasting the development of this condition in the near future; issuing on the basis of this forecast the recommendations on the optimal residual service life (up to writing off this plant or time of the next scheduled repair). The task of forecasting also includes assessment of the probability of failures in order to prevent them. When taking a decision on the possibility of further service of a specific engineering plant, the group of experts uses mathematical formalization of the intuitive idea of its residual life. The following information on each specific engineering plant (pipelines, vessels and other hazardous objects) is the basis for making the forecast:

- data of the current (fast) periodical examination for defects during service. Control can be continuous or discrete (for instance, timed to scheduled preventive

поиска дефектов в процессе эксплуатации. Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Проведенные исследования по применению акустических методов совместно с магнитными, а также методов оценки механических свойств по значениям твердости и совместно с выборочными испытаниями на разрыв позволяют использовать систему оценки качества и прогнозирования ресурса металла сварных конструкций при оценке объектов повышенной опасности. Оценка состояния элементов сварных конструкций выполняется на основе требований, приведенных в ДНАОП 0.00-1.07-94, ДНАОП 0.00-1.08-94, ДНАОП 0.00-1.11-98 и в других нормативных документах;

- данные о влиянии нагрузки и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой (диагностические данные о состоянии и истории нагружения объекта повышенной опасности);
- весь объем априорных данных о материалах, элементах, узлах, нагрузках, которые лежат в основе прогнозирования ресурса и оценки показателей надежности на стадии проектирования сварных конструкций.

Таким образом, разработанная система прогнозирования остаточного ресурса сварных конструкций позволяет рекомендовать способ оценки информации и принятия решения об остаточном ресурсе.

maintenance). The performed investigations on application of the acoustic methods together with the magnetic methods, as well as the methods of the mechanical properties evaluation by hardness values together with the selective tensile tests, allow the system of quality assessment and forecasting of the life of the welded structure metal to be used in evaluation of the more critical objects. Evaluation of the condition of welded structure elements is performed in keeping with the requirements of DNAOP 0.00-1.07-94, DNAOP 0.00-1.08-94, DNAOP 0.00-1.11-98 and other standards;

- data on the influence of load and other conditions of the object interaction with the environment (diagnostic data on the condition and loading history of the highly critical object);

- total scope of a priori data on the materials, elements, components and loads which are the basis for forecasting the life and evaluation of the reliability characteristics at the stage of welded structure design.

Thus, the developed system of forecasting the residual life of welded structures allows this method of information assessment and taking a decision on the residual life to be recommended for application.

**ТЕХНОЛОГИИ,  
ОБОРУДОВАНИЕ  
И МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ СВАРКИ,  
НАПЛАВКИ,  
ПАЙКИ, РЕЗКИ  
И НАНЕСЕНИЯ  
ПОКРЫТИЙ**

---

**TECHNOLOGIES,  
EQUIPMENT AND  
MATERIALS  
FOR WELDING,  
SURFACING,  
BRAZING, CUTTING  
AND COATING**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ДЕФЕКТЫ СТРОЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ.** А. М. Апасов (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ). Жаропрочность металлов и сплавов в значительной степени определяется наличием и развитием макроскопических дефектов, существенно ослабляющих расчетное сечение готовых дорогостоящих деталей и приводящих их в негодность. Поэтому проблема «залечивания» наиболее опасных дефектов, таких как трещины, является весьма актуальной.

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании процессов воздействия концентрированных потоков энергии лазерного излучения на микротрещины и трещиноподобные дефекты с выходом на поверхность для их устранения. Трещиноподобные дефекты имитировали путем заусерловки металла трубопровода размером 2X20 мм из стали марки 08X18H10T с последующей установкой с натягом заклепок из стали 04X19H9, которые зашлифовывали заподлицо с поверхностью трубы. Луч лазера фокусировался на границу раздела заклепки и трубы. Глубину проплавления варьировали в зависимости от длительности импульсов оптического квантового генератора (ОКГ) типа «Квант 12», уровня напряжения на его модуляторе и подтверждали металлографическими исследованиями.

Для изучения физико-химических процессов плавления, кристаллизации и трещинообразования, протекающих в результате воздействия лазерного излучения на металл, было использовано явление акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ поступали через пьезопреобразователь, установленный на трубопроводе, на измеритель акустических сигналов ИАС-4 с последующей регистрацией в аналоговом виде на самописце Н338-4П.

Для определения энергетических параметров спектра сигналов АЭ от процессов плавления, кристаллизации и трещинообразования металла был использован многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024-95, с помощью которого получены амплитудные распределения сигналов АЭ от различных составляющих процесса воздействия излучения ОКГ.

Из полученных данных следует, что амплитудные распределения сигналов АЭ в зависимости от количества импульсов излучения ОКГ характеризуют в основном процессы плавления и кристаллизации металла. Трещинообразование от воздействия лазерного излучения на металл не зафиксировано.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлена принципиальная возможность устранения (проплавления) трещиноподобных дефектов в сталях аустенитного класса с использованием импульсного излучения ОКГ. Кроме того, определено, что глубина проплавления трещиноподобного дефекта тем больше, чем выше значения напряжения на модуляторе и длительности импульса излучения ОКГ.

**СТРУКТУРА СВАРНОГО ШВА АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ.** А. М. Апасов, Э. В. Козлов (ТГАСУ, г. Томск, РФ). Исследована структура сварного шва стали марки 08X18H10T, используемой как основной материал и как сварная проволока. Методами

**STUDY OF THE PROCESS OF AFFECTING STRUCTURE OF AUSTENITIC STEELS BY PULSED LASER RADIATION.** A.M. Apasov (Division of the Tomsk Polytechnical University, Yurga, Russia). Heat resistance of metals and alloys depends greatly upon the presence and propagation of macroscopic defects which lead to a dramatic decrease in strength of the design section of finished expensive parts and finally to their failure. This makes the problem of "healing" of the most dangerous defects, such as cracks, very topical. The purpose of the work described was to experimentally study the possibility of removing microcracks and crack-like defects escaping to the metal surface by the processes involving the concentrated flows of laser radiation.

Crack-like defects were simulated by drilling holes in the steel 08Kh18N10T pipeline 2X20 mm in size and installing into them by interference fit the steel 04Kh19N9 rivets which were then ground flush with the pipe surface. The penetration depth was varied depending upon the length of pulses generated by the "Quant-12" type laser and the level of voltage at its modulator, and checked by metallography.

The acoustic emission (AE) phenomenon was utilized to investigate physical-chemical processes of melting, solidification and cracking of the metal under the effect of the laser radiation. The AE signals passed through a piezotransducer installed at the pipeline to the IAS-4 meter, which measured them, and then were recorded in an analogue form by the N338-4P recorder.

The multichannel amplitude analyser AI-1024-95 was used to identify energy parameters of the melting, solidification and cracking processes from a spectrum of the AE signals. The analyser yielded amplitude distributions of the AE signals from different components of the laser radiation effect.

It follows from the data obtained that amplitude distributions of the AE signals characterize mostly the melting and solidification processes, depending upon the number of the laser radiation pulses. Metal cracking due to the laser radiation effect was not registered.

The experimental studies conducted proved the feasibility of removing (by penetration) crack-like defects in steels of the austenitic grade by using the pulsed laser radiation. In addition, it was determined that the higher the value of the modulator voltage and the longer the laser radiation pulse, the larger the depth of penetration of a crack-like defect.

**STRUCTURE OF AUSTENITIC STEEL WELDS.** A.M. Apasov, E.V. Kozlov (TGASU, Tomsk, Russia). Structure of welds in steel 08Kh18N10T used both as the base material and welding wire was investigated. Structure of the weld, HAZ and base metals was studied by optical

оптической электронной микроскопии исследована структура металла сварного шва, околошовной зоны и основного металла. Были диагностированы фазовый состав, зеренная и дислокационная структура металла сварного шва, околошовной зоны и основного металла. Основной металл и металл околошовной зоны состоят из  $\gamma$ -фазы (ГЦК твердый раствор элементов внедрения и замещения на основе  $\gamma$ -Fe) и мелких частиц карбида TiC. В металле околошовной зоны скалярная плотность дислокаций выше, а плотность карбидных частиц ниже, чем в основном материале.

В металле сварного шва имеет место трехфазная смесь, состоящая из  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазы, а также карбидов TiC. Плотность дислокаций здесь значительно меньше, чем в остальных зонах. В металле шва большие зерна  $\gamma$ -фазы декорированы крупными частицами TiC и мелкими зернами  $\alpha$ -фазы.

Размер зерен в основном материале составляет в среднем 10 мкм, в металле околошовной зоны — 40 мкм и в металле шва — 15 мкм. При сварке зафиксировано превращение  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{TiC}$  в части материала.

В работе рассматриваются процессы, происходящие в металле шва и проблемы формирования остаточных внутренних напряжений.

#### МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ. А. М. Апасов (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ).

Цель данной работы — исследование физической природы процесса зарождения, формирования и развития трещин.

При повышении температуры из-за увеличения амплитуды колебаний атомов происходит тепловое расширение, т. е. увеличение параметра решетки. При низких температурах (от 0 K до температуры Дебая  $\theta$ ) тепловое расширение происходит нелинейно. При высоких температурах (от температуры Дебая почти до температуры плавления) увеличение параметра решетки  $a$ , изменение длины  $l$  и объема  $V$  имеют для большинства металлов линейный характер. Амплитуда колебаний при низких температурах пропорциональна  $T^3$ , а выше  $\theta$  соответствует уравнению  $A = \sqrt{kT/E_d^{\text{мет}}}$ . Увеличение параметра  $a$ , длины  $l$  и объема  $V$  образца с повышением температуры отвечает формулам

$$a = a_0 T, l = l_0 + (1 + \alpha T), \\ V = V_0 + (1 + \beta T),$$

где  $\beta \approx 3\alpha$ .

Температуру плавления можно считать критической температурой  $T_{\text{кр}}$ . При этом начинается массовое «выскакивание» атомов из узлов решетки и образование пар вакансия-внедренный атом. Если известны энергия вакансии  $E_f^v$  и внедренного атома  $E_f^i$ , а также увеличение концентрации вакансий или электронных пар при плавлении  $\Delta C_{\text{пл}}^v = \Delta V_{\text{пл}}$ , то теплота плавления должна быть равна

$$\Delta H_{\text{пл}} = \Delta C_{\text{пл}} (E_f^v + E_f^i).$$

Изменение объема металла с ГЦК-решеткой при плавлении в среднем составляет 2...3 %. Установ-

лено, что при электронном микроскопическом исследовании структура металла сварного шва, околошовной зоны и основного металла были идентифицированы. Основной металл и металл околошовной зоны состоят из  $\gamma$ -фазы (ГЦК твердый раствор элементов внедрения и замещения на основе  $\gamma$ -Fe) и мелких частиц карбида TiC. В металле околошовной зоны скалярная плотность дислокаций выше, а плотность карбидных частиц ниже, чем в основном материале.

В металле сварного шва имеет место трехфазная смесь, состоящая из  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазы, а также карбидов TiC. Плотность дислокаций здесь значительно меньше, чем в остальных зонах. В металле шва большие зерна  $\gamma$ -фазы декорированы крупными частицами TiC и мелкими зернами  $\alpha$ -фазы.

Размер зерен в основном материале составляет в среднем 10 мкм, в металле околошовной зоны — 40 мкм и в металле шва — 15 мкм. При сварке зафиксировано превращение  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{TiC}$  в части материала. В работе рассматриваются процессы, происходящие в металле шва и проблемы формирования остаточных внутренних напряжений.

#### МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ. А. М. Апасов (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ).

Цель данной работы — исследование физической природы процесса зарождения, формирования и развития трещин.

При повышении температуры из-за увеличения амплитуды колебаний атомов происходит тепловое расширение, т. е. увеличение параметра решетки. При низких температурах (от 0 K до температуры Дебая  $\theta$ ) тепловое расширение происходит нелинейно. При высоких температурах (от температуры Дебая почти до температуры плавления) увеличение параметра решетки  $a$ , изменение длины  $l$  и объема  $V$  имеют для большинства металлов линейный характер. Амплитуда колебаний при низких температурах пропорциональна  $T^3$ , а выше  $\theta$  соответствует уравнению  $A = \sqrt{kT/E_d^{\text{мет}}}$ . Увеличение параметра  $a$ , длины  $l$  и объема  $V$  образца с повышением температуры отвечает формулам

$$a = a_0 T, l = l_0 + (1 + \alpha T), \\ V = V_0 + (1 + \beta T),$$

где  $\beta \approx 3\alpha$ .

Температуру плавления можно считать критической температурой  $T_{\text{кр}}$ . При этом начинается массовое «выскакивание» атомов из узлов решетки и образование пар вакансия-внедренный атом. Если известны энергия вакансии  $E_f^v$  и внедренного атома  $E_f^i$ , а также увеличение концентрации вакансий или электронных пар при плавлении  $\Delta C_{\text{пл}}^v = \Delta V_{\text{пл}}$ , то теплота плавления должна быть равна

$$\Delta H_{\text{пл}} = \Delta C_{\text{пл}} (E_f^v + E_f^i).$$

Изменение объема металла с ГЦК-решеткой при плавлении в среднем составляет 2...3 %. Установ-

лено, что концентрация вакансий  $C = 2...3\%$  при их равномерном распределении достигается в кластере радиусом  $3...4$  координационные сферы, содержащем  $40...55$  атомов. Это отвечает минимальному радиусу кластера, равному двум металлическим диаметрам  $2d_{мет}$ .

Вакансии мигрируют из областей ближнего порядка или объема кластера на периферию, образуя неупорядоченную жидкость с высокой концентрацией вакансий. Внутри кластеров сохраняется ближний порядок, отвечающий кристаллической структуре металла. Поэтому после плавления металл представляет собой кластеры, «плавающие» в неупорядоченной жидкости с высокой концентрацией вакансий, примерно в  $2...3$  раза большей, чем  $\Delta C_{пл}^v$ . Таким образом, около половины атомов находится в кластерах с упорядоченной структурой, а остальной объем представляет неупорядоченную жидкость.

В процессе кристаллизации металла сварного шва неупорядоченная жидкость с высокой концентрацией вакансий вытесняется в центр шва в направлении, противоположном максимальному температурному градиенту. Вакансии распределяются больше около поры и меньше — вдали от поры. Концентрация вакансий вблизи поверхности поры и радиус поры связаны соотношением

$$\zeta_r = \zeta_0 + \alpha/r,$$

где  $\zeta_r$  — концентрация вакансий у поверхности поры;  $\zeta_0$  — равновесная концентрация вакансий;  $\alpha = (2\sigma/kT)(\Omega a_0)$ ;  $r$  — радиус кривизны поры;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура, К;  $\Omega$  — атомный объем.

Поскольку концентрация вакансий обратно пропорциональна радиусу поры, то возникает диффузионный поток вакансий, направленный от поверхности мелких к поверхности крупных пор, увеличивающий объем последних, так как свободная энергия убывает вследствие уменьшения поверхности пор при увеличении их размеров. Исходя из принципа минимума внутренней (поверхностной) энергии происходит дальнейший процесс коалесценции пор, являющихся источниками зарождающихся микротрещин, перерастающих впоследствии в трещину.

**НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.** Б. Н. Бадьянов (МАТИ — РГТУ им. К. Э. Циолковского, г. Москва, РФ). Развитие современных отраслей машиностроения, транспорта и строительства базируется на расширении применения материалов, металлов и сплавов все более высокой удельной прочности. Наибольший объем сварных конструкций выполняется электродуговыми способами сварки в защитных газах и под слоем флюса. Однако для получения сварных соединений со свойствами, близкими к таковым высокопрочного материала, требуется более тщательная технологическая проработка процесса как по термомеханическому циклу, так и по металлургическим аспектам способа. В частности, обоснованный выбор присадочной проволоки, смеси газов, марки флюса или пасты определяет уровень относительных показателей свариваемости в данной конструкции.

established that the concentration of the vacancies,  $C = 2-3\%$ , in the case of their uniform distribution is achieved in a cluster with a radius of  $3-4$  of the coordination sphere, which contains  $40-55$  atoms. This corresponds to a minimum radius of the cluster equal to two metal diameters ( $2d_m$ ).

Vacancies migrate from the short-range region or the volume of the cluster to periphery to form a disordered fluid with a high concentration of the vacancies. The short-range order corresponding to the crystalline structure of the metal persists inside the clusters. Therefore, after melting the metal comprises clusters floating in a statistically disordered fluid with a high concentration of the vacancies, approximately  $2-3$  times as high as  $\Delta C_{melt}^v$ . Thus, approximately half of the atoms is in the clusters with the ordered structure, while the rest of the volume is a disordered fluid.

During solidification of the weld metal the disordered fluid with a high concentration of the vacancies is pressed out to the weld centre in a direction opposite to the maximum temperature gradient. The vacancies are distributed more around a pore and to a lesser degree — far from the pore. The concentration of the vacancies near the pore surface and the pore radius are related to each other as follows:

$$\zeta_r = \zeta_0 + \alpha/r,$$

where:  $\zeta_r$  — is the concentration of the vacancies near the pore surface;  $\zeta_0$  — is the equilibrium concentration of the vacancies;  $\alpha = (2\sigma/kT)(\Omega a_0)$ ;  $r$  — is the radius of curvature of the pore;  $\sigma$  — is the surface tension;  $k$  — is the Boltzmann's constant;  $T$  — is the temperature;  $\Omega$  — is the atomic volume.

Since the concentration of the vacancies is inversely proportional to the pore radius, this causes a diffusion flow of the vacancies directed from the surface of fine pores to the surface of coarse pores. This flow increases the volume of the latter, as the free energy decreases because of a decrease in the surface of the pores with an increase in their sizes. Based on the principles of the minimum internal (surface) energy, there occurs further coalescence of the pores, which act as the initiation centres of the microcracks that further grow into a crack.

**SOME PROBLEMS OF TECHNOLOGY OF WELDING ADVANCED STRUCTURES.** B.N. Badjanov (MATI — K.E.Tsiolkovsky RGTU, Moscow, Russia). Advances in modern engineering, transport and construction industries are based on widening of the use of materials, metals and alloys with an increasingly high specific strength. However, to produce welded joints with properties close to those of a high-strength material, it is necessary to employ a thoroughly elaborated technology in terms of both thermal-deformation cycle and metallurgy aspects. In particular, the substantiated choice of a filler wire, gas mixture, flux or paste determines the level of relative indicators of weldability for a given structure.

One of the promising ways of development of welding consumables is using halide pastes and active gas mixtures for argon-arc welding. However, the reference data on this group of materials are extremely scanty, and the work on ensuring safe operation is far from

Одним из перспективных направлений развития сварочных материалов является использование галогенидных паст и активных газовых смесей для аргоно-дуговой сварки, однако справочных данных по этой группе материалов крайне мало и они плохо систематизированы. Требуется создание банка данных в виде нормативных указаний, касающихся марок свариваемых и сварочных материалов относительно составов, применения, режимов и т.д.

Так как большинство материалов с высокой удельной прочностью весьма активно реагируют на тепловое и металлургическое воздействие сварочного процесса, представляется, что замена одно- и двухпроходной сварки многопроходной хотя и снизит производительность производства конструкции, но существенно улучшит структурное состояние и механические свойства металла шва и околошовной зоны при соизмеримых суммарных энергетических затратах.

Автоматизация сварочного процесса прошла долгий путь развития от систем релейной стабилизации до компьютерного управления. Важнейшей составляющей является разработка математических моделей, отражающих процесс сварки. В разное время использовали критерии подобия, экспериментально-статистические и детерминированные модели. Современные интегральные структуры решают задачу с помощью нейросетевых моделей, а высокочувствительные датчики, регистрирующие состояние сварочной ванны (вводимую тепловую мощность, температуру, излучение плазменного факела и др.), позволяют проводить прямое адаптивное управление через компьютер без математической модели с использованием эффектов саморегулирования.

Важным звеном в развитии сварочных процессов и технологий является изучение и совершенствование свариваемости материалов. Разработано множество методик для определения свойств сварного соединения и его отдельных зон; границ оптимальных режимов сварки; стойкости против образования горячих и холодных трещин, хрупкого разрушения, коррозионной стойкости и т.д. Однако вызывает сомнение целесообразность применения в качестве обобщенного критерия производства относительных показателей всех перечисленных выше признаков.

#### **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ.**

*В. П. Березиенко, Ф. Г. Ловшенко (Машиностроит. ин-т, г. Могилев, Республика Беларусь).* Работоспособность и внешний вид металлоконструкций в значительной мере зависят от технологии контактной точечной и рельефной сварки. Применение традиционной технологии не исключает получения точечных соединений с нестабильной статической и циклической прочностью и вмятинами от электродов на лицевых поверхностях деталей. Перечисленные недостатки, а также значительные растягивающие напряжения в точке и околоточечной зоне, способствующие низкой работоспособности соединений, сдерживают применение контактной сварки при изготовлении ответственных металлоконструкций.

being active enough. The data on welding consumables can be found in monographs and handbook, but they are incomplete and insufficiently systematized. It is necessary to create a data bank in the form of regulatory recommendations concerning grades of base materials and welding consumables, their compositions, application, conditions, etc.

As most of the materials with a high specific strength are highly reactive to thermal and metallurgical effects of the welding process, it is thought that although the replacement of single- and two-pass welding by the multipass process will decrease the fabrication capacity, it will improve structural state and mechanical properties of the weld and HAZ metal, the total energy expenditures being commensurable.

Automation of the welding process has passed a long way from the relay stabilization systems to computerized control. The most important component here is development of mathematical models which describe the welding process. At different times the use was made of the similarity criteria, experimental-statistical and deterministic models. Modern integrated structures solve the problem using the neural network models. High-sensitivity transducers that sense the weld pool conditions (heat input, temperature, plasma flame radiation, etc.) allow a direct adaptive control to be realized using computers without mathematical models, based on the self-adjustment effects.

An important link in development of the welding processes and technologies is investigation and improvement of weldability of materials, as well as determination of its criteria. Many procedures are available for determination of properties of a welded joint and its zones, finding the limits of optimal welding conditions, testing to hot and cold cracking, brittle fracture, corrosion resistance, etc. However, the expediency of application of a generalized criterion as a product of relative indicators of all of the above properties cannot but cause doubts, since the result fails to reveal critical aspects of the process. Instead, it dilutes them in a total product of relative values.

#### **SERVICEABILITY OF RESISTANCE SPOT WELDED JOINTS.** *V.P. Bereziienko, F.G. Lovshenko (Machine-Building Institute, Mogilev, Belarus).*

Serviceability and appearance of metal structures greatly depend upon the technology of resistance spot and relief welding. The traditional technology does not exclude production of spot joints with unstable static and cyclic strength and with dents on the face surfaces of the parts caused by electrodes. The above drawbacks and considerable tensile stresses in the spot and its zones restrict the use of resistance welding for the fabrication of critical metal structures.

Investigations of the spot welded joints in low-carbon and low-alloy steels made it possible to reveal a number of regularities in the kinetics of their formation, the effect of the welding process parameters and methods of ap-

Исследования точечных соединений, выполненных на низкоуглеродистых и низколегированных сталях, позволили выявить ряд закономерностей кинетики их формирования, влияние параметров режима сварки и способов приложения ковочного усилия электродами различной конструкции и с различными теплофизическими свойствами на характер напряженно-деформированного состояния, форму литого ядра точки и ее структуру. При определении рациональных параметров режима сварки следует учитывать, что «жесткие» режимы сварки, снижая объемные остаточные напряжения, способствуют образованию закалочных структур. При использовании «жестких» режимов сварки и последующей проковки из-за различия температур металла центральной части и периферии точки на стадии охлаждения, а также наличия между свариваемыми деталями в ограниченной зоне металлической связи возможно образование сжимающих напряжений. Указанные напряжения в сочетании с рациональными размерами и конфигурацией литого ядра точек способствуют снижению концентрации рабочих напряжений и препятствуют зарождению усталостных трещин.

Возможности изменения условий охлаждения и теплофизических свойств рабочей части кольцевых пуансонов для осуществления проковки позволяют вести сварку на «жестких» режимах и регулировать конфигурацию литого ядра, глубину вмятин от электродов, структуру и напряженно-деформированное состояние соединения. Для реализации «жесткого» режима сварки потребовалось создание специальных электродных материалов, отличающихся высокими показателями жаропрочности и износостойкости. Разработанный процесс их получения основан на применении технологии механического легирования. Он включает разmol реакционноспособных смесей на основе меди в механореакторе, продуктом которого является гранулированная композиция, перерабатываемая в электродный материал способом порошковой металлургии. Технология обеспечивает получение дисперсионно-упрочненных материалов с микрокристаллическим типом структуры основы, который характеризуется высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированных ультрадисперсными включениями упрочняющих фаз. Основой материалов является низкоконцентрированный раствор алюминия ( $< 0,1\%$  Al) в меди с размером зерен  $\leq 0,3$  мкм, размер ОКР  $\leq 50$  нм. Основной упрочняющей фазой являются частицы  $Al_2O_3$  размером  $\leq 10$  нм. Объем ее составляет 2...4 %. Полученная структура обеспечивает высокие показатели физико-механических свойств электродных материалов. В зависимости от количества упрочняющей фазы они характеризуются следующими параметрами: твердость  $HB\ 170...280$ ;  $HB^{500}\ 70...100$ ;  $\sigma_B = 730...1010$  МПа;  $\sigma_B^{500} = 320...500$  МПа;  $\sigma_{100}^{500} = 210...250$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 3...8\%$ ; температура ре-

пPLICATION of a forging force with electrodes of different configuration and different thermal-physical properties on the character of the stressed-strained state, shape of a cast nugget of the weld spot and its structure. Compressive stresses may be formed in the case of using "rigid" welding conditions and subsequent forging, because of differences in temperature of the metal in the central part and periphery of the spot at a stage of cooling, as well as the presence of metal bond between the parts welded within a limited zone. These stresses, combined with rational sizes and configurations of the cast nugget of the spots favour decrease in the concentration of effective stresses and prevent initiation of fatigue cracks.

The possibilities of variations in cooling conditions and thermal-physical properties of the working portion of annular punches to apply forging allow welding to be performed under the "rigid" conditions, as well as configuration of the spot nugget, depth of the dents caused by electrodes, structure and stressed-strained state of the welded joint to be regulated. To realize the "rigid" welding conditions it was necessary to make special electrode materials characterized by high values of heat and wear resistance. The process developed for their manufacture is based on the use of the technology of mechanical alloying. It includes crushing of reactive copper-based mixtures in a mechanical reactor, yielding a composition processed into an electrode material by the powder metallurgy method. The technology provides dispersion-strengthened materials with the single-crystal type of structure of the base, which is characterized by a highly developed surface of grain and sub-grain boundaries stabilized by ultradispersed inclusions of the strengthening phases. The base of the materials is a low-concentration solution of aluminium ( $< 0.1\%$  Al) in copper with grains  $\leq 0.3\ \mu m$  in size and the crystalline lattice  $\leq 50\ nm$  in size. The basic strengthening phase consists of the  $Al_2O_3$  particles  $\leq 10\ nm$  in size. Its volume is 2-4 %. The produced structure ensures a high complex of physical-mechanical properties of electrode materials. Depending upon the amount of the strengthening phase, it is characterized by the following parameters: hardness —  $HB\ 170-280$ ,  $HB^{500}\ 70-100$ ; strength —  $\sigma_t = 730-1010\ MPa$ ,  $\sigma_t^{500} = 320-500\ MPa$ ,  $\sigma_{100}^{500} = 210-250\ MPa$ ; elongation —  $\delta = 3-8\%$ ; recrystallization temperature —  $800-900\ ^\circ C$ ; electrical conductivity is 70-75 % of that of copper.

Choice of the rational welding parameters, development of the electrode material and design of electrode feed mechanisms to supply the welding current and apply the forging force make it possible to increase cyclic strength of the welded joints 1.4-1.8 times and static strength — by 20-25 %. Decreasing the concentration of effective stresses in the case of using the relief joints of a circular and elongated shape, as well as spot joints

кристаллизации 800...900 °C; электропроводность — 70...75 % электропроводности меди.

Выбор рациональных параметров режима, разработка материала электродов и конструкции электродных устройств для подвода сварочного тока и приложения конвекционного усилия позволяют повысить циклическую прочность соединений в 1,4...1,8 раза, статическую — на 20...25 %. За счет снижения концентрации рабочих напряжений при использовании рельефных соединений кольцеобразной и продолговатой формы, а также точечных соединений круглой формы с увеличенным диаметром литого ядра циклическая прочность повышается на 25...30 %.

#### ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЛИГАТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ КАРБЮРИЗАТОРОВ. Н. Ю. Борд, В. А. Артюхов, О. Ф. Минченко (Науч.-исслед. и конструкторско-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь).

Восстановление изношенных узлов и деталей машин, а также нанесение на поверхность изделий слоев металла, характеризующихся особыми эксплуатационными свойствами, имеет большое значение. Однако для этого требуется применение специальных электродов, содержащих в составе покрытий, наряду с традиционными газо- и шлакообразующими, а также другими компонентами, легирующие добавки, обеспечивающие необходимые характеристики сварного шва.

Для Республики Беларусь, не имеющей собственной сырьевой базы, становится особенно актуальной проблема разработки оригинальных технологий, позволяющих использовать образующиеся в производстве вторичные металлы на основе карбидов титана, вольфрама и др.

Одним из возможных путей снижения зависимости от поставок из-за рубежа дорогостоящих лигатур может стать регенерация вторичных металлов.

В НИКТИ СП с ОП проводятся исследования, направленные на разработку методов газотермического синтеза специальных твердосплавных лигатур. Показана возможность получения комплексных соединений титана и вольфрама из их оксидов с использованием вторичных твердосплавных материалов.

Технологический процесс газотермического синтеза карбидов тугоплавких металлов основан на восстановлении-карбидизации предварительно окисленного материала в газовой контролируемой атмосфере с применением твердых карбюризаторов. В отличие от регенерации в условиях только контролируемых газовых атмосфер, при их совместном применении с твердыми карбюризаторами получается мелкодисперсный порошок даже при высоких температурах (до 1500 °C) и быстрой загрузке шихты в высокотемпературную зону печи. При этом выдержка в высокотемпературной зоне не должна превышать требуемую для полного протекания процесса восстановления-карбидизации. В противном случае частицы получаемого порошка начнут спекаться с заметной скоростью.

Рост зерен карбидов при применении твердых кар-

of a round shape with an increased diameter of the cast nugget leads to an increase of 25-30 % in cyclic strength of the joints.

#### GAS-THERMAL SYNTHESIS OF HARD MASTER ALLOYS USING HARD CARBURIZERS. N. Yu. Bord, V. A. Artyukhov, O. F. Minchenko (Research and Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus).

Reconditioning of worn out machine parts and components and application of metal layers characterized by special service properties to the part surfaces is of high industrial importance.

However, this requires the use of special electrodes that contain in their covering, in addition to traditional gas- and slag-forming agents, as well as other elements, also such alloying elements that could ensure the desirable characteristics of the welds.

The problem of development of original technologies for recycling secondary metals based on carbides of titanium, tungsten, etc. is especially pressing for Belarus which has no raw materials base of its own.

One of the possible ways of decreasing its dependence upon deliveries of expensive master alloys from abroad is regeneration of secondary metals.

The Research and Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production is active in development of methods for gas-thermal synthesis of special hard master alloys. Studies conducted by the Institute proved the feasibility of producing complex compounds of titanium and tungsten from their oxides using secondary hard-alloy materials.

The process of gas-thermal synthesis of carbides of refractory metals is based on reduction-carbidization of preliminarily oxidized materials in the controlled gas atmosphere using hard carburizers.

Unlike regeneration in the controlled gas atmospheres alone, their use in combination with hard carburizers provides a finely dispersed powder even at high temperatures (up to 1500 °C) and rapid loading of the charge into the high-temperature zone of a furnace. In this case the time of holding in the high-temperature zone should not exceed that needed for the process of reduction-carbidization to be completed. Otherwise, particles of the resulting powder will start sintering at a marked acceleration rate.

Hard carburizers inhibit growth of carbide grains by covering the surface of oxide grains with a thin layer of carbon black. Owing to the adsorption properties of carbon black, the process of reduction-carbidization of oxides of refractory metals formed at high temperatures in the charge vapours occurs first on the surface of the carbon black particles, rather than on the surface of primary crystals of a material being regenerated.

бюрлизаторов тормозится потому, что поверхность зерен оксидов покрывается тонким слоем сажи. Благодаря адсорбционным свойствам сажи, процесс восстановления-карбидизации образующихся при высоких температурах в парах шихты оксидов тугоплавких металлов происходит в первую очередь на поверхности частиц сажи, а не на поверхности первичных кристаллов регенируемого материала. За счет использования контролируемых газовых атмосфер количество свободного углерода в конечном продукте можно снизить до 0,2 %, а кислорода до 0,1 %.

В зависимости от технологических режимов (продолжительность, температура, состав газовой смеси, количество твердого карбюризатора) возможно получение сложных карбидных соединений, а также смеси заданного состава.

Таким образом, новый процесс газотермического синтеза позволит получать специальные легирующие добавки, используемые при производстве сварочных и наплавочных материалов.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА СПОСОБАМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА.** Н. Ю. Борд, В. А. Артюхов, О. Ф. Минченко (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). Восстановление изношенных деталей машин является актуальной задачей, поскольку при этом достигается значительная экономия материальных ресурсов и трудозатрат. Однако, как правило, для этих целей используют специальные наплавочные материалы, при изготовлении которых применяются дефицитные и дорогостоящие легирующие элементы.

Представляет большой интерес совмещение процессов наплавки и термической обработки в контролируемых атмосферах заданного состава. При этом возможно решение задачи использования недефицитных вторичных материалов, включаемых в состав наплавочных материалов, которые в результате химического взаимодействия с атмосферой приобретают требуемые эксплуатационные свойства и изменяют свой химический состав.

Исследовано влияние параметров термической обработки в защитной атмосфере на процессы карбидизации наплавленного металла на основе железа с включением оксида хрома. Показана возможность восстановления изделий и получения высококачественных поверхностных слоев, отличающихся повышенной твердостью и износостойкостью.

В качестве материала для наплавки использовали порошок железа с добавкой 5 % оксида хрома. После наплавки на поверхность металла слоя толщиной 0,7...1,3 мм образцы обрабатывали в атмосфере диссоциированного аммиака с различными добавками природного газа при температуре 900...950 °C.

При повышении температуры до 950 °C, наряду с упрочнением тонкого поверхностного слоя на глубине от 0,4 до 0,5 мм (общая толщина наплавки до 1,4 мм), твердость возрастает до  $H_{50}$  400...650 в зависимости от продолжительности обработки, а твердость граничного слоя — до  $H_{25}$  200...300.

By using the controlled gas atmospheres the amount of free carbon in a finished product can be decreased to less than 0.2 % and that of oxygen — to less than 0.1 %. Depending upon the process parameters (time, temperature, gas mixture composition, amount of hard carburizer), it is possible to produce complex carbide compounds and mixtures of desirable chemical compositions.

Therefore, the new process of gas-thermal synthesis makes it possible to produce special alloying additions which can be used for the manufacture of welding and cladding consumables.

**OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF DEPOSITED METAL BY THE METHODS OF GAS-THERMAL SYNTHESIS.** N.Yu.Bord, V.A.Artyukhov, O.F.Minchenko (Research and Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus). Reconditioning of worn out machine parts is a pressing problem, as it can provide a fundamental saving of materials and labour. However, special welding consumables are used as a rule for these purposes. To manufacture them, it is necessary to utilize expensive and scarce alloying elements.

Of high industrial interest is a combination of the processes of welding and heat treatment in controlled atmospheres of a preset chemical composition. In this case it is possible to solve the problem of utilization of readily available secondary materials, which can be included into the composition of welding consumables. As a result of chemical interaction with the atmosphere, they acquire the desirable service properties and change their chemistry.

The effect of parameters of heat treatment in a shielding atmosphere on the processes of carbideization of the deposited iron-based metal with chromium oxide inclusions has been investigated. The investigations show the feasibility of reconditioning parts and producing high-quality surface layers characterized by increased hardness and wear resistance.

Powders of iron with a chromium oxide addition of 5 % were used as the welding consumables. After depositing a layer 0.7–1.3 mm thick on the metal surface, the samples were treated in the atmosphere of dissociated ammonia with different additions of natural gas at a temperature of 900–950 °C.

Increasing the temperature to 950 °C causes hardening of a thin surface layer to a depth from 0.4 to 0.5 mm deep (total thickness of the deposited metal layer is up to 1.4 mm) and an increase in hardness of up to  $H_{50}$  400–650, depending upon the time of treatment, while hardness of the boundary layer increases to  $H_{25}$  200–300.

# **ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОРОШКА ЦИНКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ.** Л. Г. Ворошнин, Л. А. Антошина (Белорус. гос. политех. акад.; Науч.-исслед. и констр.-технол. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь).

Одним из способов сохранения стойкости сварного шва в условиях агрессивных сред является его химико-термическая обработка (ХТО). Обычно применяемые для создания защитных покрытий порошковые среды токсичны, склонны к спеканию, не дают стабильных результатов при многократном использовании. Гидротермальная обработка (ГТО) порошковых насыщающих сред для диффузионного цинкования позволяет повысить температуру ХТО.

Предложенный Р. Г. Галиным способ диффузионного цинкования в порошковых средах дает возможность избавиться от недостатков, присущих традиционному способу. Порошковые среды, используемые при диффузионном цинковании, подвергаются специальной предварительной обработке. Технология диффузионного цинкования с использованием порошковых сред с ГТО порошка цинка является экологически чистой. Ее достоинствами являются отсутствие в порошковых средах галогенидных активаторов, исключение образования экологически вредных стоков и выбросов, отсутствие потребности в предварительной подготовке поверхности изделия перед ХТО, обеспечение качественного покрытия поверхности.

Процесс цинкования происходит в результате присутствия в системе паров цинка. На основе анализа возможных при данной технологии механизмов цинкования пришли к выводу, что наиболее вероятно прохождение процесса насыщения при испарении жидкого цинка через трещины слоя ZnO, покрывающего частицу порошка цинка. Вывод сделали после расчета равновесного давления паров цинка над поверхностями ZnO и  $\delta$ -фазы. Процесс диффузионного цинкования выполняли в порошковых средах, содержащих 100 % порошка цинка с ГТО. Гидротермальную обработку порошка цинка марки ПЦ-4 осуществляли путем кипячения. Диффузионное цинкование происходило при температурах от 450 до 600 °C в течение 1 и 3 ч. Использовали образцы, изготовленные из конструкционной стали 15 марок. Исследовали влияние температуры процесса ХТО, состава стали на структуру покрытия, а также на соотношение толщин фаз, составляющих покрытие, при данном способе цинкования.

Полученное диффузионное покрытие имеет следующую структуру: на поверхности насыщаемого изделия располагается  $\alpha$ -фаза (твердый раствор цинка в  $\alpha$ -Fe), затем  $\Gamma$ -фаза, основной слой покрытия ( $\delta$ -фаза). При визуальном осмотре зафиксировано, что после ХТО образцы имели гладкую светло-серую поверхность без следов налипания смеси.

Таким образом, металлографическим анализом установлено, что использование насыщающих сред при цинковании с ГТО порошка цинка позволяет получать качественные диффузионные цинковые покрытия как при длительности насыщения 3 ч, так при времени насыщения 1 ч. Для всех исследуемых сталей увеличение продолжительности насыщения

# **APPLICATION OF HYDROTHERMAL TREATMENT OF ZINC POWDER FOR RECONDITIONING OF PROTECTIVE COATINGS ON WELDED JOINTS.** (L.G.Voroshnin, L.A.Antoshina (Belarus Polytechnical Academy, Research and Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus).

One of the ways of maintaining strength of the welds under conditions of aggressive environments is to subject them to thermochemical treatment (TCT). Powders that are normally used to produce protective coatings are toxic, susceptible to sintering and do not yield consistent results in multiple use. Hydrothermal treatment (HTT) of the saturation powder media applied for diffusion galvanizing allows an increase in the TCT temperature.

The method of diffusion galvanizing in powder media suggested by R.G.Galin makes it possible to avoid drawbacks typical for the traditional method. The powder media used for diffusion galvanizing are subjected to special preliminary treatment. The technology for diffusion galvanizing, involving the powder media with HTT of the zinc powder, is environmentally safe. Its advantages include the absence of halide activators in the powder media, elimination of formation of environmentally hazardous sewage and effluents, no need for preliminary preparation of workpiece surfaces for TCT and ensuring sound surface coating.

The galvanizing process occurs as a result of zinc vapours present in the system. Analysis of the galvanizing mechanisms that possibly can take place in the case of using this technology allowed a conclusion that the most probable process occurring here is saturation in evaporation of liquid zinc through cracks in the ZnO layer covering the zinc powder particles. The conclusion was made after calculation of equilibrium pressure of the zinc vapours over the ZnO and  $\delta$ -phase surfaces.

Diffusion galvanizing was carried out in the powder media containing 100 % HTT zinc powder. HTT of the zinc powder of the PTs-4 grade was performed by boiling. Diffusion galvanizing occurred at temperatures of 450 to 600 °C for 1 and 3 hours. Test samples were made from structural steel of 15 grades. The effect of the TCT process temperature and steel composition on the coating structure and ratio of thickness of the phases making the coating at the given galvanizing method was studied.

The resulting diffusion coating has the following structure:  $\alpha$ -phase (solid solution of zinc in  $\alpha$ -Fe) located on the surface of a workpiece subjected to saturation, then  $\Gamma$ -phase and basic coating layer —  $\delta$ -phase.

Visual examination showed that after TCT the samples had a smooth light-gray surface with no traces of adhering mixture.

As proved by metallography, the application of the saturation media for galvanizing using HTT of the zinc powder allows the sound diffusion zinc coatings to be produced at a saturation time of 3 and 1 hour. For all of the steel grades investigated an increase in the time of saturation leads to an increase in thickness of the diffusion zinc coating.

способствует увеличению толщины диффузионного цинкового покрытия. Насыщающие среды могут использоваться многократно (частота использования не влияет на качество покрытия).

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ УГЛОВЫХ ШВОВ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ ОБЪЕМНЫХ СУДОКОРПУСНЫХ СЕКЦИЙ.** Е. Д. Гавриленко (УГМТУ, г. Николаев, Украина). В объемных металлоконструкциях крупнотоннажных судов прерывистые угловые швы — наиболее типичные сварные соединения, выполняемые механизированной сваркой в защитных газах ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ). При этом нередко возникают проблемы с необходимостью соблюдения заданной геометрической формы и качества проплавки угловых швов, вызванные сложностью обеспечения устойчивого переноса электродного металла для относительно малых скоростей подачи проволоки ( $v_{\text{пр}} \leq 8 \text{ м/мин}$ ).

Достижение гарантированного качества при формировании угловых швов возможно за счет внедрения адаптивных сварочных роботов, автоматически оптимизирующих импульсные и поисковые параметры дуги. В то же время точность сборки таких конструкций может способствовать возникновению характерных для роботизированной сварки дефектов формы углового шва: неравнобокость; вогнутость; несплавление; завышение или занижение расчетной толщины.

В судостроении требованиями международных классификационных обществ и стандартов ISO 6520, EN 25817 для каждого из выделенных дефектов установлены допуски, диапазоны варьирования которых зависят от назначаемой расчетной толщины и степени ответственности углового шва в секции. Роботизированная сварка требует однозначного согласования всех допусков относительно фактических отклонений электрода от линии соединения и положения свариваемых кромок.

Представлены результаты анализа формы углового шва, полученные при программировании отклонений конца электрода от оси стыка и принятых заранее сборочных зазоров в тавровых соединениях ( $\delta$  и  $b$  — до 5 мм). Показано, что отклонения и зазоры имеют различное влияние на перераспределение зон сплавления по периферии наплавленного металла шва, в частности, на определение регламентируемой стандартами глубины проплавления. При этом поставленная задача решена для МАГ-сварки за счет применения сплошных и порошковых проволок малого диаметра в различных пространственных положениях.

Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на итоговые показатели формирования углового шва при роботизированной сварке оказывают особенности техники программирования траектории движения горелки и технологические свойства сварочной дуги. Так, программирование характерных позиций задержки и концентрированное вложение тепла для сварки в смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  предопределило появление ярко выраженных участков сплавления в металле околосварной зоны, что вызвало перепад измеренных глубин

The saturation media can be used many times (frequency of the use has no effect on the coating quality).

**EXAMINATION OF QUALITY OF FORMATION OF FILLET WELDS IN ROBOTIC WELDING OF THREE-DIMENSIONAL SHIP HULL SECTIONS.** E. D. Gavrilenko (UGMTU, Mykolaiv, Ukraine). Intermittent fillet welds are the most typical welded joints made by mechanized gas-shielded ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ) welding in volumetric metal structures of high-tonnage ships. This is the case which involves problems with the necessity of providing a preset geometrical shape and quality of penetration of fillet welds, which is associated with difficulty of ensuring stable electrode metal transfer at a relatively low wire feed speed ( $v_{w,f} \leq 8 \text{ m/min}$ ).

The guaranteed quality of formation of fillet welds can be achieved by using adaptive welding robots, which provide automatic optimization of pulsation and sensed parameters of the arc. At the same time, accuracy of assembly of such structures might lead to shape defects of the fillet welds characteristic of robotic welding, such as irregular side surfaces, concavity, excessive or insufficient design thickness.

International classification societies and standards ISO 6520 and EN 25817 in force in ship building specify tolerances for each of the above defects, the ranges of which depend upon the assigned design thickness and degree of importance of a fillet weld in a section. Robotic welding requires definite matching of all the tolerances regarding actual deviations of electrodes from the joining line and position of the weld edges.

Results of investigation of the fillet weld shape obtained by programming deviations of the electrode tip from the welded joint axis and preliminarily accepted assembly gaps in T-joints ( $\delta$  and  $b$  — up to 5 mm) are presented. It is shown that the deviations and gaps have different effect on redistribution of the fusion zones on the periphery of the deposited metal, in particular on determination of the penetration depth specified by the standards. The problem posed has been solved for MAG welding by using small-diameter solid and flux-cored wires in different spatial positions.

Analysis of the investigation results showed that the highest effect on final properties of formation of the fillet welds made by robotic welding was exerted by peculiarities of the process of programming the path of the torch and operational properties of the welding arc. Thus, programming of characteristic positions of lag and concentrated heat input for welding in a mixture of  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  predetermined appearance of clearly defined fusion regions in the weld zone, which caused differences in the measured penetration depth. In the case of using the flux-cored wire, the decisive effect is exerted by the intensity of feed and melting of the electrode wire ( $v_{w,f} \geq 10 \text{ m/min}$ ). The stable increase in the arc power creates the necessary conditions for producing comprehensive and deep penetration in the fillet weld

проплавления. При переходе на порошковую проволоку определяющее значение имеет интенсивность подачи и плавления электродной проволоки ( $V_{п.пр} \geq 10$  м/мин). Стабильное повышение мощности дуги создает необходимые условия для получения всеобъемлющего и глубокого проплавления в корне углового шва, вследствие чего может быть расширен диапазон устанавливаемых технологических допусков. В работе предложены расчетные схемы и математические зависимости для определения допустимых отклонений и зазоров с учетом действующих в судостроении требований.

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ НА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ВЕРФЯХ УКРАИНЫ.** Е. Д. Гавриленко, С. М. Самохин (УГМТУ, г. Николаев, Украина), Ю. В. Солониченко (ОАО «Океан», г. Николаев, Украина). В судостроении Украины накоплен богатый опыт применения механизированной и автоматической сварки сплошными проволоками в углекислом газе. Несмотря на простоту и доступность ему присущи и недостатки (повышенный расход наплавленного металла на 1 пог. м шва; высокий уровень трудозатрат на зачистку брызг после сварки; в ряде случаев недостаточные плотность и пластичность металла шва; завышенные выпуклости и чешуйчатость шва; невысокие показатели производительности наплавки в нижнем (до 4 кг/ч) и вертикальном (до 2 кг/ч) пространственных положениях). При этом сварку судокорпусных конструкций выполняют по грунтованным поверхностям, что существенно увеличивает потери металла на разбрызгивание. Отмеченные недостатки являлись одной из причин низкой конкурентоспособности продукции отечественного судостроения на мировых рынках. Первым шагом в направлении повышения эффективности сварки судокорпусных секций стал переход на защитные смеси ( $Ar + (10...25) \% CO_2$ ). Проведенные комплексные исследования показали, что за счет внедрения защитной смеси  $Ar + 18 \% CO_2$  удалось достичь определенных технологических преимуществ — повышения значения прочности и ударной вязкости металла шва; обеспечение необходимого уровня легирования наплавленного металла; получение гладкой формы профиля угловых швов; снижение разбрызгивания; уменьшение энергозатрат; улучшение внешнего вида швов; повышение скоростей сварки и производительностей наплавки (нижнее до 6, вертикальное до 3 кг/ч). Благодаря использованию смесей на основе аргона впервые в начале 1990-х гг. в Украине были проведены классификационные испытания в соответствии с требованиями международных судостроительных обществ. Применительно к сварке тавровых и стыковых соединений судокорпусных конструкций получили одобрение используемые сварочные материалы, признано оптимальным качество сварных швов. Однако низкое качество сплошных отечественных проволок и повышенная стоимость аргона препятствуют широкому освоению этого способа сварки в судостроении. В то же время недостаточное количество высокотехнологичного микропроцессорного оборудования на инверторной базе сдерживает внедрение импульсно-дуговых технологий.

root. In turn, this can result in widening of the ranges of the technology tolerances. The work done includes the calculation diagrams and mathematical dependencies to determine permissible deviations and gaps on the basis of the standards in force in ship building.

**EXPERIENCE OF USING GAS-SHIELDED WELDING AT SHIP YARDS OF UKRAINE.** E.D.Gavrilenko, S.M.Samokhin (UGMTU, Mykolaiv, Ukraine), Yu.V.Solonicenko (Stock Holding Company «OKEAN», Mykolaiv, Ukraine). Ship building industry of Ukraine has accumulated great experience in applying mechanized and automatic  $CO_2$  welding using solid wire. Despite simplicity and affordability, this process is characterized also by some drawbacks, such as an increased consumption of deposited metal per running meter of a weld, high labour expenditure for removing spatters after welding, in some cases — insufficient density and ductility of the weld metal, excessive reinforcement and rippled surfaces of the welds, as well as low deposition efficiency in flat (up to 4 kg/h) and vertical (up to 2 kg/h) positions. Welding of the ship hull structures is performed on the surfaces coated by a primer, which leads to a substantial increase in losses of metal for spattering. The noted drawbacks were one of the causes of low competitiveness of the domestic ship building products in the world markets.

The first step towards increase in the efficiency of welding of the ship hull sections was transition to using the shielding mixtures ( $Ar + 10-25 \% CO_2$ ). The comprehensive investigations conducted showed that the use of the  $Ar + 18 \% CO_2$  shielding mixture provided certain technological advantages, such as increase in strength and impact toughness of the weld metal, achievement of the required level of alloying of the deposited metal, providing a smooth shape of the fillet weld profile, decrease in spattering, reduction of labour consumption, improvement in the exterior appearance of the welds, increase in the welding speed and deposition efficiency (in the flat position — up to 6 kg/h and in the vertical position — up to 3 kg/h). Owing to the use of the argon-base mixtures, for the first time in Ukraine the qualification tests were conducted early in the 1990s in compliance with requirements of the international ship building societies. The used welding consumables were approved for welding T- and butt joints in ship hull structures, the quality of the welds being recognized as optimal. However, the low quality of domestic solid wires and high price of argon hamper wide application of this welding method in ship building. At the same time, the insufficient amount of high-technology inverter-based microprocessor equipment limits the application of pulse-arc technologies.

Since the middle of the 1990s the commercial application of thin flux-cored wires for gas-shielded welding in the ship building industry of Ukraine created prerequisites for coming back to the use of carbon dioxide shielding, which is less expensive, as compared to argon

С середины 1990-х гг. промышленное освоение в судостроении Украины тонких порошковых проволок для сварки в защитных газах создало предпосылки для возвращения к более дешевой по сравнению с аргонной защитной среде в углекислом газе. В связи с этим на судостроительных верфях Николаева и Херсона был выполнен комплекс сравнительных оценочных испытаний некоторых отечественных и импортных порошковых проволок (ПП-АН59, ППС-ТМВ7, ПП-АН26, PZ6113, PZ6113S, TI-58-FD, CN-23/12-FD, Outershield 71C-H). Полученные результаты позволили выбрать экономически выгодные и качественные новые присадочные проволоки для сварки судокорпусных конструкций, разработать технологические рекомендации по их промышленному применению. Так, впервые в Украине в ноябре 1997 г. на судостроительной верфи «Океан» была выполнена роботизированная сварка тонкой порошковой проволокой PZ6113S вертикального углового шва.

**ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.** А. А. Гейзер (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь, Украина). Сварочный трансформатор является основным элементом аппаратного оборудования при производстве электросварочных работ. В системах автоматизации технологических процессов сварки зачастую необходимо формирование положительных и отрицательных обратных связей, вследствие чего возникает вопрос об амплитудно-фазовых соотношениях между напряжениями и токами трансформатора. Уже десятки лет обсуждается проблема выбора основных уравнений трансформатора. Объясняется это разительным несоответствием положений классической теории, данных эксперимента и практики. Согласно классической теории, основные уравнения трансформатора имеют вид

$$U_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} + r_1 I_1,$$

$$U_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} + r_2 I_2.$$

Из приведенных уравнений и построенной на их основе векторной диаграммы видно, что входное  $U_1$  и выходное  $U_2$  напряжения находятся в противофазе, хотя результаты экспериментов свидетельствуют, что между указанными напряжениями нет противофазы. Для устранения этого противоречия некоторыми авторами предлагается альтернативная форма записи основных уравнений трансформатора, но при этом следует исключить знак минус в формуле закона электромагнитной индукции, однако этот знак имеет глубокий физический смысл и выражает известное правило Ленца. Для устранения противоречия предпринимается попытка разработки теории работы трансформатора с использованием нашей трактовки явления электромагнитной индукции, поскольку принцип работы трансформатора основан на этом явлении. Для трансформатора на основе второго закона Кирхгофа и предлагаемой нами записи закона электромагнитной индукции можно написать следующие уравнения:

для первичной обмотки

$$I_1 r_1 = \frac{A_{cr}}{q} - \left[ \frac{d(n_1 \Phi_1)}{dt} - \frac{d(n_1 \Phi_2)}{dt} \right], \quad (1)$$

shielding. In this connection, the ship yards in Mykolaiv and Kherson carried out a package of comparative evaluation tests of some domestic and foreign-made flux-cored wires (PP-AN59, PPs-TMV7, PP-AN26, PZ6113, PZ6113S, TI-58-FD, CN-23/12-FD, Outershield 71C-H). The results obtained allowed selection of the cost effective and qualitatively new filler wires for welding ship hull structures and development of the technological recommendations for their wide commercial application. Thus, for the first time in Ukraine in November 1997 the ship yard "OKEAN" performed robotic vertical fillet welding using thin flux-cored wire PZ6113S.

**BASIC EQUATIONS OF THE WELDING TRANSFORMER.** A.A. Gierzer (Priazovsky State Technical University, Mariupol, Ukraine). Welding transformer is the basic element of hardware intended for electric welding operations. Systems for automation of welding processes often require formation of positive and negative feedbacks, this involving the issue of amplitude-phase relationships between voltages and currents of the transformer. The problem of selection of basic equations for the transformer has been the subject of discussions for decades. This is attributable to a dramatic difference between concepts of the classical theory and experimental and practical data. According to the classical theory, basic equations of the transformer are as follows:

$$U_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} + r_1 I_1,$$

$$U_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} + r_2 I_2,$$

It can be seen from the above equations and the vector diagram plotted on their base that input  $U_1$  and output  $U_2$  voltages are in antiphases, although the experimental results evidence that there is no antiphase between these voltages. To eliminate this discrepancy, some authors suggest an alternative form for writing basic equations of the transformer. This requires that the "minus" sign be excluded from the formula of the electromagnetic induction law. However, this sign has a deep physical meaning and expresses the known Lenz's law. To eliminate this contradiction, let us try to work out the theory of the transformer using our interpretation of the electromagnetic induction phenomenon, as the principle of operation of the transformer is based particularly on this phenomenon. Based on the second Kirchhoff's law and the form we suggest for writing the electromagnetic induction law, the following equations can be written for the transformer:

for primary winding:

$$I_1 r_1 = \frac{A_{cr}}{q} - \left[ \frac{d(n_1 \Phi_1)}{dt} - \frac{d(n_1 \Phi_2)}{dt} \right], \quad (1)$$

и для вторичной обмотки

$$I_2 R_2 + I_2 r_2 = \frac{A_{\text{ст}2}}{q_2} - \frac{d(n_2 \Phi_2)}{dt}, \quad (2)$$

где  $I_1, I_2$  — токи в первичной и вторичной обмотках, создающие магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ;  $r_1, r_2$  — сопротивления обмоток при количестве витков  $n_1$  и  $n_2$ ;  $A_{\text{ст}}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q_1$  по источнику тока и первичной обмотке;  $R_2$  — сопротивление нагрузки;  $A_{\text{ст}2}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q_2$  по цепи вторичной обмотки трансформатора.

К этим уравнениям следует добавить еще одно — уравнение токов нагруженного трансформатора. Оно может быть получено, исходя из правила Ленца для магнитных потоков

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_0,$$

где  $\Phi_0$  — поток холостого хода трансформатора. Для создания этих потоков требуются намагничивающие силы

$$I_1 n_1 - I_2 n_2 = I_{10} n_1.$$

Учитывая, что токи являются синусоидальными величинами, переменными во времени, имеем формулу

$$I_1 = I_{10} + I_2 n_2 / n_1, \quad (3)$$

которая представляет собой уравнение токов нагруженного трансформатора.

После преобразования уравнений (1) и (2) получим следующую систему уравнений:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 - \underline{E}_{21} + \underline{U}_{r1}; \quad (4)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{E}_{22} + \underline{U}_{r2}. \quad (5)$$

Из этих выражений и построенной на их основе векторной диаграммы видно, что между напряжениями  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$  нет противофазы, что и подтверждается результатами эксперимента.

Таким образом, уравнения (3)–(5) являются основными, которые можно применить и для сварочного трансформатора.

**СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ.** В. В. Головки (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Сварка под флюсом пульсирующей дугой (СФПД) является новым прогрессивным вариантом, отличающимся высокой экономичностью при сохранении уровня производительности и надежности, характерного для этого процесса в целом.

Исследования, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона по изучению технологии СФПД, были сосредоточены на рассмотрении условий формирования структуры металла швов и ЗТВ высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей. С этой целью производили сопоставление образцов сварных соединений, выполненных на постоянном токе при обратной полярности стационарной дугой (СД) и с использованием технологии СФПД.

for secondary winding:

$$I_2 R_2 + I_2 r_2 = \frac{A_{\text{ст}2}}{q_2} - \frac{d(n_2 \Phi_2)}{dt}, \quad (2)$$

where  $I_1$  and  $I_2$  are the currents in the primary and secondary windings, which create magnetic fluxes  $\Phi_1$  and  $\Phi_2$ ;  $r_1$  and  $r_2$  are the resistances of the windings at the  $n_1$  and  $n_2$  numbers of the turns;  $A_{\text{ст}1}$  is the energy of the external forces causing movement of charge  $q_1$  in the current source and the primary winding;  $R_2$  is the load resistance;  $A_{\text{ст}2}$  is the energy of the external forces causing movement of charge  $q_2$  in the circuit of the secondary winding of the transformer.

These equations should be supplemented with one more basic expression, i.e. equation of the loaded transformer currents. It can be derived from the Lenz's law for magnetic fluxes:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_0,$$

where  $\Phi_0$  is the flux of the open-circuit voltage of the transformer.

The following magnetization forces are required to generate these fluxes:

$$I_1 n_1 - I_2 n_2 = I_{10} n_1.$$

Considering that the currents are the sinusoidal magnitudes which vary with time, the following formula holds:

$$I_1 = I_{10} + I_2 n_2 / n_1, \quad (3)$$

which is the equation of the loaded transformer currents.

Transformation of equations (1) and (2) yields the following system of equations:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 - \underline{E}_{21} + \underline{U}_{r1}; \quad (4)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{E}_{22} + \underline{U}_{r2}. \quad (5)$$

It can be seen from these equations and the vector diagram plotted on their base that there is no antiphase between voltages  $\underline{U}_1$  and  $\underline{U}_2$ , which is proved by the experimental results. Therefore, equations (3) to (5) are the basic equations which can be used also the welding transformer.

#### PULSED SUBMERGED-ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEELS. V.V. Golovko

(E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Pulsed submerged-arc welding (PSAW) is a new advanced version characterized by high cost effectiveness and maintaining the level of productivity and reliability typical for this process as a whole.

Investigations conducted at the E.O. Paton Electric Welding Institute to study the PSAW technology were focused on conditions of formation of structure of the weld and HAZ metal in high-strength low-alloy (HSLA) steels. For this purpose a comparison was made of samples of welded joints made at direct current of reverse polarity using the stationary arc (SA) and by the PSAW technology.

Primary structures of metal of the investigated welds share the presence of columnar composition with crys-

Общим для первичных структур металла исследованных швов является их столбчатое строение с ориентированием кристаллитов по направлению перемещения фронта кристаллизации и наличие слоистости в виде чередующихся темных и светлых полос. Различаются эти структуры характером чередования и изменением толщины кристаллизационных слоев по высоте шва. Так, для первичной структуры варианта СД характерно наличие слоистого строения, выявляемого травлением в основном в районе корня шва. Толщина каждого последующего слоя увеличивается по высоте шва и на расстоянии 1,5...2,0 мм от нижней кромки шва достигает значений 0,6...0,7 мм, что в 4,0...4,5 раз больше по сравнению с самыми нижними слоями. В центральной части шва и ближе к его выпуклости кристаллизационные слои выявить не удалось. Отличительной особенностью первичной структуры металла сварных швов, выполненных СФПД, является наличие периодичности в формировании кристаллизационных слоев, проявляющейся прежде всего в формировании «тонких» и «толстых» слоев по высоте шва. Толщина таких слоев составляла соответственно 0,04...0,12 мм и 0,15...0,35 мм, причем меньшие значения из приведенных диапазонов относятся к кристаллизационным слоям, расположенным вблизи корня шва, а большие — к участкам, находящимся на расстоянии 4,0...4,5 мм выше. Сравнительное сопоставление толщины слоев в швах, выполненных по обеим технологиям, показывает, что при импульсном варианте процесса формируются слои в 2,0...2,5 раза более тонкие, чем при СД.

Различия в характере периодичности кристаллизации расплавленного металла отражаются на параметрах этого процесса и прежде всего на его длительности и скорости одного цикла. Скорость кристаллизации металла швов составляет для СД 5,17 мм/с в корневом участке шва и 3,13 мм/с в его верхней части. Для швов, полученных по технологии СФПД, эта скорость равнялась 5,39 мм/с в корне и 5,06 мм/с в верхней части. Средняя продолжительность кристаллизации одного слоя расплава в корневой части шва достигала 1,36 с для варианта СД и 0,45 с для импульсного режима. Этот же параметр, определенный для верхних участков шва, составлял 2,24 с для базовой технологии и 0,48 с для СФПД. Импульсный подвод тепла в сварочную ванну, характерный для данного способа сварки, способствует тому, что за время, при котором в случае базовой технологии кристаллизуется один слой металла, при СФПД происходит кристаллизация трех слоев.

Сокращение длительности пребывания расплава при температурах свыше 1000 °C (примерно в два раза) и более быстрое охлаждение металла в диапазоне температур 800...500 °C является характерной особенностью импульсного режима сварки. Такой характер термического цикла СФПД способствует формированию аустенита с малой площадью зерен и снижению содержания закалочных структур на участке крупного зерна ЗТВ сварных соединений ВПНЛ сталей примерно в два-три раза. Изменения в структуре металла швов и ЗТВ сварных соединений, вызванные импульсным характером горения сварочной дуги, оказывают влияние на служебные свойства сварных соединений, особенно на

talline grains oriented in a direction of movement of the solidification front and the presence of lamination in the form of alternating dark and light layers. These structures differ in character of alternation and variation in thickness of the solidification layers through thickness of the weld. Thus, the primary structure of the SA weld is characterized by the laminated composition which is revealed by etching mostly in the weld root region. Thickness of each subsequent layer increases in the weld height, and at a distance of 1.5–2.0 mm from the lower weld edge it reaches values of 0.6–0.7 mm, which is 4.0–4.5 times as high as in the lowest layers. In the central part of the weld and closer to its concavity no solidification layers were revealed.

A distinctive feature of the primary structure of the PSAW weld metal is the presence of periodicity in the formation of the solidification layers, which shows up first of all in the formation of "thin" and "thick" layers through the weld thickness. These layers are 0.04–0.12 and 0.15–0.35 mm thick, respectively. The lower values of the above ranges refer to solidification layers located near the weld root and higher — to the regions located at a distance of 4.0–4.5 mm above the weld root. Comparison of thickness of layers in the welds made by both technologies shows that in the case of the pulsed version of the process the layers formed are 2.0–2.5 times thinner than in the case of the SA version.

Differences in the character of periodicity of solidification of the molten metal affect parameters of the process and first of all its duration and the rate of one cycle. The rate of solidification of the weld metal for SA is 5.17 mm/s in the root portion of the weld and 3.13 mm/s in its upper part. For the welds made by the PSAW technology this rate was 5.39 mm/s in the weld root and 5.06 mm/s in the weld top part. The average duration of solidification of one layer of the melt in the weld root part was 1.36 s for SA and 0.45 s for PSAW. This parameter determined for the upper parts of the welds was 2.24 s for the basic technology and 0.48 s for PSAW.

The pulsed heat input to the weld pool characteristic of this welding method leads to the fact that for the time during which in the case of the basic technology only one metal layer is solidified, in the case of PSAW three layers are solidified.

Reduction in time during which the metal dwells at temperatures above 100 °C approximately two times and more rapid cooling of the metal within the temperature range of 800–500 °C are the characteristic features of the pulsed welding conditions. This character of the thermal cycle of PSAW leads to the formation of austenite with a small area of grains and decrease of approximately 2–3 times in the content of quenching structures in the coarse grain region of the HAZ of welded joints in HSLA steels. Changes in structure of the weld and HAZ metal of the welded joints caused by the pulsed character of burning of the welding arc affect performance of the welded joints, especially their cold crack resistance. The PSAW technology allows welding of HSLA steels up to 40 mm thick with a yield strength of

их стойкость против образования холодных трещин. Технология СФПД позволяет производить сварку ВПНЛ сталей толщиной до 40 мм с пределом текучести до 520 МПа без предварительного подогрева, а сталей толщиной до 60 мм с пределом текучести до 620 МПа — с предварительной просушкой кромок при температуре 60 °С. Подобное снижение температуры предварительного подогрева, а в некоторых случаях и отсутствие необходимости в подобной технологической операции, применительно к изготовлению крупногабаритных свариваемых конструкций позволяет получить значительную экономию энергоносителей и улучшить условия работы сварщиков.

#### РАСЧЕТНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГИГИЕНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ.

*В. Ф. Демченко, О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий, С. С. Козлитина (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).* При выборе систем вентиляции рабочего места сварщика в производственных помещениях и средств индивидуальной защиты органов дыхания необходимы данные о количественном и качественном составах выделяющихся сварочных аэрозолей (СА). Количество и состав СА зависят от технологии сварки (наплавки), а также от используемых сварочных материалов. Если учесть, что в современном сварочном производстве используется несколько десятков способов сварки и наплавки, а ассортимент сварочных (наплавочных) материалов приближается к тысяче, то количество разнообразных вариантов, которые необходимо принимать во внимание при проектировании систем обеспечения благоприятных (с гигиенической точки зрения) условий труда сварщиков, весьма велико. При этом информация о составе СА для различных условий сварки систематизирована недостаточно и остается во многих случаях недоступной для инженерно-технических работников предприятий, занимающихся организацией сварочного производства. С целью оздоровления условий труда и профилактики профессиональных заболеваний рабочих-сварщиков выполнена работа по сбору и систематизации информации о количестве и составах СА, образующихся при применении различных технологий сварки и сварочных материалов. Анализ структуры собранной информации показал, что в зависимости от вида сварки — ручная покрытыми электродами, механизированная в защитных газах и самозащитная (проволоками сплошного сечения, порошковыми, активированными и порошковыми лентами, неплавящимся электродом), автоматическая под флюсом (плавленые и керамические флюсы в комбинации с соответствующими проволоками) — ее целесообразно объединить в три группы и создать на этой основе базы данных сварочных аэрозолей (соответственно для электродов, сварочных проволок и флюсов).

Для поддержания баз данных в актуальном состоянии разработан редактор баз данных, позволяющий пополнять их новой информацией и корректировать существующие данные. С помощью редактора баз данных в память компьютера вводится информация об особенностях конкретного вида сварки и факторах, влияющих на химический состав и уровни выделений СА (класс основного металла,

up to 520 MPa without preheating, and steels up to 60 mm thick with a yield strength of up to 620 MPa — with preliminary drying of edges at a temperature of 60 °C. This decrease in temperature of preheating and in some cases the absence of the need for this operation for the fabrication of large-size welded structures provide substantial saving of power supplies and improvement of working conditions of the welders.

#### INFORMATION-COMPUTATION SYSTEM FOR HYGIENIC CHARACTERISTICS OF WELDING AEROSOLS.

*V.F.Demchenko, O.G.Levchenko, V.A.Metlitsky, S.S.Kozlitsina (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).*

Selection of systems for ventilation of work places of welders and means for individual protection of respiratory organs requires data on quantitative and qualitative composition of welding aerosols (WA). Quantity and composition of WA depend upon the welding (surfacing) technology and consumables. Given that dozens of welding and surfacing methods are in use now in the welding industry and that the range of welding (surfacing) consumables is close to a thousand, the number of variants which have to be taken into account to design systems to ensure favourable (from the hygienic standpoint) working conditions for welders is enormous. The information on composition of WA for various welding conditions is insufficiently systematized and in many cases it is unavailable for engineering-technical staff involved in industrial engineering at welding facilities.

The information on quantity and composition of WA formed with different welding technologies and consumables was collected and systematized in order to improve working conditions and prevent occupational diseases of welding operators. Analysis of structure of the collected information showed that it is reasonable to break down the data on WA of welding consumables into three groups, depending upon the type of welding - manual covered-electrode, gas-shielded mechanized, self-shielding (using solid and flux-cored wires, activated and flux-cored strips, non-consumable electrodes) and submerged-arc welding (using fused or ceramic fluxes in combination with appropriate wires) — and then use these groups to create the data bases for welding aerosols (for electrodes, welding wires and fluxes, respectively).

The special editor was developed to provide regular updating of these data bases. The editor makes it possible to supplement the data bases with new information and correct the existing data. It is used to enter into the computer memory the information on peculiarities of a specific welding process and factors affecting chemical composition and levels of evolution of WA (grade of base metal, welding consumable type, welding parameters, shielding gas composition, etc.), as well as the data on hygienic properties of WA. The latter include chemical composition, level of evolution and toxicity of WA; intensity of WA formation, g/min; specific evolution of WA, g/kg; coefficient of intensity of WA formation,

вид сварочного материала, режим сварки, состав защитного газа и др.), а также данные, касающиеся гигиенических показателей СА. К последним относятся химический состав, уровень выделений и токсичность СА; интенсивность образования СА, г/мин; удельное выделение СА, г/кг; коэффициент интенсивности образования СА, г/кВт·ч; коэффициент удельного выделения СА, г/кВт·кг; содержание компонента в составе СА, % по массе; интенсивность образования компонента СА, г/мин; удельное выделение компонента СА, г/кг; коэффициент интенсивности образования компонента СА, г/кВт·ч; коэффициент удельного выделения компонента СА, г/кВт·кг; воздухообмен общеобменной вентиляции, м<sup>3</sup>/кг (согласно отечественной методике); интенсивность воздухообмена, м<sup>3</sup>/ч (по международной методике). При работе информационно-расчетной подсистемы формируется запрос к базе данных, на основе которого пользователь получает исчерпывающую информацию о гигиенических характеристиках сварочных материалов в зависимости от условий сварки, а также рекомендации по средствам местной вентиляции и индивидуальной защиты органов дыхания сварщиков. Рекомендации разработаны на основе предложенной в ИЭС им. Е. О. Патона гигиенической и химической классификации СА и способов сварки, при которых они образуются.

**РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАБРЫЗГИВАНИЯ СОПЛ ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ.** В. В. Дмитрик, А. Н. Пашченко (Укр. инж.-пед. акад., г. Харьков, Украина). При сварке в углекислом газе из-за интенсивного разбрызгивания и налипания брызг расплавленного металла на рабочие участки поверхности сопел и токоподводящих мундштуков уменьшается ресурс их использования, снижается стабильность процесса, появляются дефекты в наплавленном металле.

Для предотвращения забрызгивания предложили использовать сопла и токоподводящие мундштуки с термостойкими покрытиями, наносимыми на их рабочие поверхности. Металлы и сплавы, предназначенные для нанесения покрытий, должны быть повышенной чистоты. Их получали путем электронно-лучевого переплава. Разработана новая технология нанесения термостойких покрытий на рабочие поверхности сопел и токоподводящих мундштуков, реализуемая на установках типа «Буллат». Строение покрытий формировали путем изменения энергии ионного осаждения при соответствующем использовании металлов и сплавов. Термостойкие покрытия имели переменный химический состав ингредиентов, которые подбирали по соответствующей степени когерентности их структур и образующихся остаточных напряжений. В состав покрытий различных композиций входили нитриды титана и циркония, а также карбиды и оксиды тугоплавких металлов (ниобия, хрома, молибдена, вольфрама, титана и ванадия). Строение первого переходного слоя покрытия, характеризующегося высокой степенью адгезии к подложке (рабочая поверхность), формировали при повышенных значениях энергии осаждения. Его структуру, на наш взгляд, можно классифицировать как твердый раствор внедрения. Последующие слои формировали на тех значениях энергии осаждения,

г/кВт·ч; коэффициент специфической эволюции WA компонента, г/кВт·кг; воздухообмен, предоставляемый общей вентиляцией по разбавлению, м<sup>3</sup>/кг (согласно национальным стандартам); интенсивность воздухообмена, м<sup>3</sup>/ч (согласно международным стандартам).

The information-computation subsystem generates an inquiry to the data base, on the basis of which a user obtains the comprehensive information on hygienic characteristics of welding consumables depending upon the welding conditions, as well as recommendations for means of local ventilation and individual protection of respiratory organs of welders. The recommendations are based on hygienic and chemical classification of WA and welding processes in which they are formed, which was developed by the E.O.Paton Electric Welding Institute.

#### DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT COATINGS FOR PREVENTION OF CONTAMINATION OF NOZZLES WITH SPATTERS FORMED IN CO<sub>2</sub> WELDING.

V.V.Dmitrik, A.N.Pashchenko (Ukrainian Engineering-Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine). CO<sub>2</sub> welding causes intensive spattering and adhesion of molten metal spatters to working surfaces of nozzles and current-conducting torches, which leads to reduction of their service life, decrease in the process stability and formation of defects in deposited metal.

To prevent spattering, it was suggested that heat-resistant coatings should be applied to working surfaces of nozzles and current-conducting torches. Metals and alloys intended for application of the coatings should be of increased purity. Such materials were produced by electron beam remelting. The new technology realized using the "Bulat" type machines was developed for application of heat-resistant coatings to working surfaces of nozzles and current-conducting torches. The required structure of the coatings was provided by changing the energy of ion deposition and using the appropriate metals and alloys. The heat-resistant coatings had a variable chemical composition of ingredients, which were selected on the basis of the required coherency of their structures and residual stresses formed. The coatings contained titanium and zirconium nitrides, as well as carbides and oxides of refractory metals (niobium, chromium, molybdenum, tungsten, titanium and vanadium). The required structure of the first transition layer characterized by a high degree of adhesion to the substrate (working surface) was formed at increased values of the deposition energy. In our opinion, this structure can be classed as interstitial solid solution. Subsequent layers were formed at such deposition energy values which provided coherency of the structures, minimum possible phase stresses and gradients of linear expansion. The final layer was characterized by the highest heat resistance and strength, as com-

которые обеспечивали когерентность структур, наличие возможно меньших фазовых напряжений и градиентов линейного расширения. Завершающий слой характеризовался наибольшими, по сравнению с предыдущими, термостойкостью и прочностью. Установлено, что оптимальной является суммарная толщина покрытий — 20...30 мкм. Рабочая термостойкость покрытий составляла 800...1800 °C. Отмечали близкую к линейной зависимость между шероховатостью подложки и ее забрызгиванием. Параметры шероховатости подложки целесообразно выбирать возможно меньшими, например в интервале  $R_z = 0,50...3,10$  мкм. Поверхность наносимых покрытий повторяет шероховатость поверхности подложки и имеет зеркальный блеск.

Предлагаемые термостойкие покрытия целесообразно применять в составе сопел токоподводящих мундштуков горелок автоматов, а также полуавтоматов для сварки в углекислом газе, что позволит повысить стабильность процесса, уменьшить вероятность появления дефектов в наплавленном металле и увеличить ресурс использования самих сопел и токоподводящих мундштуков.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ РТК ПРИ СВАРКЕ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ.** С. В. Драган, Е. Д. Гавриленко (УГМТУ, г. Николаев, Украина), Ю. В. Солонищенко (ОАО «Океан», г. Николаев, Украина). Качество изготовления судовых конструкций на уровне требований международных классификационных обществ достигается путем применения сертифицированных сварочных материалов, оборудования и эффективной организации производства.

Мировой опыт судостроения показал, что необходимое качество соединений в сочетании с высокой производительностью процессов обеспечивается при выполнении сварки корпусных конструкций роботизированным способом. Однако при изготовлении с использованием РТК крупных секций (массой до 200 т) более 50 % сварных швов приходится выполнять с использованием РТК в положениях, отличных от нижнего. Выбор сенсорной системы наведения горелки на линию сварки в этом случае определяется точностью сборки секции, особенно вертикальных тавровых соединений рамного набора.

Исследование технологии сборочных работ при изготовлении крупных корпусных секций на судостроительных заводах юга Украины показал, что точность сборки удовлетворяет требованиям классификационных обществ при выполнении сварки механизированным способом. Применение автоматической или роботизированной сварки требует ужесточения этих требований либо использования эффективных сенсорных систем. Пересмотр требований к точности сборки связан с существенным удорожанием технологии, поэтому более рационально применение соответствующих сенсоров РТК.

Установлено, что при сборке рамного набора высотой до 2 м с полотном секции в вертикальных тавровых соединениях имеет место смещение линии сопряжения от теоретической в пределах 10...20 мм, а сборочные зазоры превышают допустимые для данной расчетной толщины углового шва. Качественное сварное соединение в таких условиях может быть получено роботизированным способом путем

pared with preceding layers. The optimal total thickness of a coating was established to be 20–30 μm. Operating heat resistance of the coatings was 800–1800 °C. Relationship between roughness of the substrate and its contamination with spatters was close to linear. The substrate roughness parameters should be kept at minimum, for example, in a range of  $R_z = 0.50\text{--}3.10$  μm. Surface of the deposited coatings copies that of the substrate and has a mirror lustre.

It is advisable to apply the suggested heat-resistant coatings to the nozzles and current-conducting torches of automatic and semi-automatic CO<sub>2</sub> welding devices, as this will reduce the probability of formation of defects in deposited metal and extend service life of the nozzles and current-conducting torches.

**TECHNOLOGICAL ASPECTS OF SELECTION OF A SENSOR SYSTEM FOR ROBOTIC HARDWARE USED FOR WELDING SHIP STRUCTURES.** S.V.Dragan, E.D.Gavrilenko (UGMTU, Mykolaiv, Ukraine), Yu.V.Soloniichenko (Stock-Holding Company "OKEAN", Mykolaiv, Ukraine). The required quality of fabrication of ship structures at a level of requirements of international classification societies is achieved by using certified materials and equipment, as well as efficient industrial engineering methods.

As shown by the world experience of ship building, the required quality of joints combined with a high capacity of processes involved is ensured in the case of welding ship structures by the robotic method. However, in the manufacture of large sections (up 200 t in weight) using robotic hardware (RH) more than 50 % of welds are made with RH in a position other than the flat one. Selection of the sensor system for guiding the arc torch to the welding line in this case is based on the accuracy of assembly of a section, especially of vertical T-joints in framing.

Investigations of the assembly technology used to make large hull sections at ship yards in the south of Ukraine show that the accuracy of assembly meets requirements of the classification societies for the case of mechanized welding. For automatic or robotic welding it is necessary to use either more stringent requirements or more efficient sensor systems. Revision of requirements for the accuracy of assembly is associated with a substantial rise in the technology costs. In this connection, the use of the appropriate RH sensors seems more reasonable. It was found that in assembly of framing up to 2 m high with a section the actual mating line in vertical T-joints might deviate from the theoretical one within a range of 10–20 mm and that the assembly gaps might be in excess of those tolerated for a given calculated thickness of a fillet weld. The quality welded joint can be produced under such conditions by the robotic method through combining the spatial transfer of programmed trajectories using the electric contact sensors and the real-time search by the welding arc. In this case thin

комбинации пространственного переноса программируемых траекторий электроконтактными сенсорами и текущего поиска шва сварочной дугой. В качестве сварочных материалов можно использовать тонкие порошковые рутиловые проволоки с защитой зоны сварки углекислым газом.

В тавровых соединениях, в местах притыкания рамного набора к плоской обшивке секций, смещение линии сопряжения элементов не превышает 3 мм; размеры сборочных зазоров также соответствуют требованиям нормативных документов. Роботизированная сварка таких соединений обеспечивается при пространственном переносе сварочных программ электроконтактными сенсорами без использования текущей адаптации. Сварочными материалами при этом служат проволоки сплошного сечения в сочетании с защитным газом  $\text{CO}_2$  или газовой смесью (18 %  $\text{CO}_2$  + 82 % Ar), а также порошковые рутиловые проволоки с защитной средой  $\text{CO}_2$ .

Апробация технологии сварки с применением РТК на базе робота LIMAT RT-260, выполненная на судостроительном заводе «Океан» при изготовлении днищевых секций крупнотоннажных балкеров, показала ее достаточную эффективность и возможность использования на судостроительных предприятиях Украины.

#### **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ И РАЗУПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. М. Л. Жадкевич**

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). На прочность и ресурс работы сварных соединений и конструкций большое влияние оказывает качество исходного металлопроката, получаемого обработкой давлением. Существующие стандарты предусматривают в основном контроль химического состава и механических свойств металла. Причем уровень последних, как правило, минимальный, поскольку рассчитан на крупносерийное производство металлопроката при низких температурных режимах деформации.

Экспериментальные исследования высокотемпературного упрочнения и разупрочнения металлов и сплавов, а также математическое моделирование этих процессов и технологий обработки металлов давлением позволяют получать высокие значения прочностных и пластических характеристик металла полуфабриката, необходимой для дальнейшей сварки структуру и при этом вести процессы обработки давлением с высокими скоростями деформирования.

Реологическое поведение металла при различных условиях деформации, характеризующееся сопротивлением деформации, является главным фактором при определении температурно-скоростных и силовых условий процесса. Сопротивление деформации металла как интенсивность напряжений, достаточных для осуществления пластической деформации, зависит не только от многих свойств самого металла, но и от условий деформации, температуры, скорости и степени деформации, контактного трения, упрочнения и разупрочнения металла в процессе его деформирования, продолжительности паузы между циклами деформирования, охлаждения металла и т. п. Основным способом изучения этих процессов является анализ влияния пластической деформации на изменение структуры и свойств ма-

rutile wires and  $\text{CO}_2$  used as the shielding gas can be utilized as the welding consumables.

In T-joints, at locations where the framing adjoins the flat skin of the sections, deviation of the mating line is not in excess of 3 mm; sizes of the assembly gaps also correspond to those specified in the regulatory documents. Robotic welding of such joints is provided by spatial transfer of welding programs with the electric contact sensors using no real-time adaptation. Welding consumables in this case are solid wires combined with  $\text{CO}_2$  or a gas mixture of 18 %  $\text{CO}_2$  + 82 % Ar used as the shielding gas, as well as flux-cored rutile wire with  $\text{CO}_2$  shielding.

The welding technology involving RH based on the "LIMAT RT-260" robot was tested at the "OKEAN" ship yards for the manufacture of bottom sections of high-tonnage bulker vessels. The tests proved sufficient efficiency of the technology and its applicability for the ship yards of Ukraine.

#### **HIGH-TEMPERATURE HARDENING AND WEAKENING OF METALS AND ALLOYS. M.L.Zhadkevich**

(E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Strength and service life of welded joints and structures are greatly affected by the quality of initial metal rolled stock produced by pressure treatment. The standards in force provide mostly for inspection of chemical composition and mechanical properties of metal. As a rule, the level of the latter is minimal, as it is intended for low deformation conditions practiced in mass production of rolled metal products.

Experimental studies of high-temperature hardening and weakening of metals and alloys, as well as mathematical modelling of these processes and technologies for pressure treatment of metals make it possible to provide high values of strength and ductile characteristics of metal of semi-finished products and a structure required for subsequent welding, as well as perform the pressure treatment processes at high deformation rates.

Rheological behaviour of metal under different deformation conditions, which is characterized by its deformation resistance, is the main factor determining the temperature-rate and loading conditions of the process. The deformation resistance of metal, in terms of the intensity of stresses sufficient for plastic deformation to occur, depends not only upon many properties of the metal proper, but also upon the deformation conditions, temperature, rate and degree of deformation, contact friction, hardening and weakening of metal during the process of its deformation, duration of pauses between the deformation cycles, cooling, etc. The main method used to study these processes is analysis of the effect of plastic deformation on variations in structure and properties of the material and identification of regularities associated with the metal form changing. The hot deformation process is described by the flow curves (deformation diagrams), which are used as the basis for construction of different models of plastic deformation.

териала, а также определение закономерностей, связанных с формоизменением металла. Процесс горячей деформации материала описывается кривыми текучести (диаграммы деформаций), которые являются основой построения различных моделей пластической деформации. В настоящее время накоплен большой материал по сопротивлению деформации металлов и сплавов, полученный методом пластометрических исследований на кулачковых и торсионных пластометрах. Этот метод позволяет с большей точностью моделировать развитие деформационного упрочнения и динамического разупрочнения, а также различные законы развития деформации (дробная, монотонная, ступенчатая, с учетом охлаждения металла и т. п.). Сопротивление деформации исследовалось на сжатие и растяжение для большой номенклатуры металлов и сплавов при различных температурно-скоростных условиях деформации с учетом упрочнения (разупрочнения). По результатам пластометрических исследований выполнена математическая обработка полученных данных и построены зависимости сопротивления деформации от температурно-скоростных факторов испытаний в виде кривых деформационного упрочнения, а также динамического и статического разупрочнения.

Результаты пластометрических исследований открыли возможность для создания физико-математических моделей течения материалов при их деформации, позволили прогнозировать с достаточной точностью механические свойства и структуру деформированного материала, что имеет большое значение при использовании металлопроката для создания различных сварных соединений и конструкций.

#### СТРОИТЕЛЬСТВО ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ БИПЛАСТМАССОВЫХ ТРУБ. К. И. Зайцев (АО «ВНИИСТ», г. Москва, РФ).

Эксплуатация и освоение новых месторождений нефти и газа, содержащих агрессивные составляющие (сероводород, углекислоту) сопряжены с возрастающими отказами стальных трубопроводов вследствие их поражения внутренними трещинами. Предпринимаемые меры защиты от коррозии (ингибирование, снижение давлений, покрытия) хотя и снижают, но не исключают вероятности аварий.

Большим прогрессом в области защиты промышленных трубопроводов от коррозии является применение труб из пластмасс (полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и др.). Однако трубы из монополимеров не могут воспринимать давления выше 1,0...1,2 МПа, в то время как давление на скважинах и шлейфах газопромыслов достигает 4...10 МПа.

В мировой практике эта проблема решается несколькими путями. Например, для повышения прочности труб из термопластов производится их армировка стальной сеткой, волокнистыми, синтетическими или натуральными материалами, металлической лентой или сочетанием перечисленных ингредиентов.

Были предприняты многочисленные попытки использовать для газопроводов трубы из стеклопластиков на основе эпоксидных и полиэфирных смол. Но при этом возникали проблемы борьбы с устра-

The vast information arrays have been accumulated recently concerning the deformation resistance of metals and alloys by the method of plastometry using cam and torsional plastometers. This method allows a high accuracy modelling of development of deformation hardening and dynamic weakening, as well as of various deformation development principles (fractional, monotonous, stepwise, allowing for metal cooling, etc.). The deformation resistance was studied under compression and tension for a wide range of metals and alloys under most diverse temperature-rate deformation conditions on the basis of hardening (weakening). Mathematical processing of the data obtained was performed by the plastometry results, and dependencies of the deformation resistance upon the test temperature-rate factors were plotted in the form of curves of deformation hardening and dynamic and static weakening.

The plastometry results offered the possibility for development of physical-mathematical models of flow of materials under deformation, allowed mechanical properties and structure of the deformed material to be predicted at a sufficient accuracy level, which is of high importance for fabrication of different types of welded joints and structures.

#### CONSTRUCTION OF FIELD PIPELINES OF BIPLASTIC PIPES. K.I. Zaitsev (VNIIST, Moscow, Russia).

Operation and mastering of new oil and gas fields containing aggressive components (hydrogen sulphide, carbon dioxide) are characterized by an increasing number of failures of steel pipelines caused by their damage due to internal cracks. The existing corrosion protection means (inhibition, decrease in pressure, coatings), although they reduce the probability of accidents, fail to completely eliminate them.

The use of plastic pipes (polyethylene, polypropylene, polyvinylchloride, etc.) provided a break-through in the field of corrosion protection of field pipelines. However, pipes made from monopolymers cannot withstand pressure above 1.0-1.2 MPa, whereas pressure in the gas production wells amounts to 4-10 MPa.

In the world practice this problem is solved in several ways. For example, to increase strength of the pipes of thermoplastic materials, they are reinforced with steel lath, fibres, synthetic or natural materials, metal strip or their combination.

Numerous attempts were made to try out glass-reinforced plastics based on epoxy or polyester resins to make pipelines. But that caused problems associated with elimination of gas permeability of thermosetting compounds used, together with glass fibres, to form a pipe. In this respect combination of gas tightness of polyethylene pipes and strength of glass-reinforced plastics showed promise.

нением газопроницаемости термореактивных композитов, из которых с применением стеклоткани формируется труба. Перспективным оказалось сочетание газопроницаемости полиэтиленовых труб и прочности стеклопластика.

В России рядом организаций были разработаны конструкции труб из композитных материалов, отличающиеся высокой прочностью и герметичностью, предназначенные для транспорта нефти и газа при давлении до 10 МПа.

Наиболее удачной конструкцией стали трубы, выпуск которых освоил АО «Композит-нефть». Они состоят из двух слоев: внутреннего из полиэтилена высокой плотности и наружного из стеклопластика. Предприятием поставляются также комбинированные трубы и соединительные детали к ним диаметром от 63 до 130 мм на рабочее давление до 10 МПа. При участии АО «ВНИИСТ» решен вопрос технологии монтажа трубопроводов из этих труб в полевых условиях с получением равнопрочного и газопроницаемого соединения.

Соединение труб производится в два этапа: контактная сварка оплавлением полиэтиленовых кромок труб (для получения герметичности), затем наложение составной муфты на клеевые компаунды для обеспечения осевой и радиальной прочности трубопровода.

Уже уложены и успешно работают на промыслах при высоких давлениях более 200 км трубопроводов из таких труб. В ближайшее время будет организовано производство комбинированных труб большего диаметра.

#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ СТРИНГЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. А. Я. Ищенко, А. А. Бондарев, Андр. А. Бондарев (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

В различных отраслях промышленности, таких как судостроение, транспортное машиностроение, авиа- и ракетостроение, находят широкое применение тонколистовые стрингерные панели с набором ребер жесткости различных профилей. Использование высокопрочных алюминиевых сплавов при изготовлении панелей существенно снижает массовые показатели при обеспечении высоких значений прочности и жесткости.

К настоящему времени накоплен определенный опыт и разработано несколько способов изготовления панельных оребренных конструкций, но наиболее перспективным является применение различных способов сварки. Известны примеры использования контактной, диффузионной, аргоно-дуговой сварки, а также высококонцентрированных лучевых источников нагрева лазерного и электронного луча при изготовлении стрингерных панелей. Однако при любом способе сварки их изготовление сопряжено с рядом проблем, главной среди которых является обеспечение высокой точности геометрических форм и размеров готовых изделий.

Предпринимаются поиски новых путей снижения остаточных сварочных деформаций в процессе сварки, их устранения после выполнения сварочных операций.

Среди средств и приемов, направленных на снижение остаточных сварочных деформаций сварных оребренных панелей, наиболее распространенны-

В России некоторые институты разработали специальные конструкции труб из композитных материалов. Такие трубы характеризуются высокой прочностью и газонепроницаемостью и предназначены для транспортировки нефти и газа при давлении до 10 МПа.

Трубы, изготовленные АО «Композит-Нефть» имеют наиболее удачную конструкцию. Они состоят из двух слоев: внутреннего из полиэтилена высокой плотности и внешнего из стеклопластика. Компания производит комбинированные трубы и фитинги для труб диаметром от 63 до 130 мм, предназначенные для эксплуатации при давлении до 10 МПа. В сотрудничестве с ВНИИСТ, компания решила проблему технологии сборки трубопроводов из этих труб в полевых условиях, обеспечивая получение равнопрочного и газонепроницаемого соединения.

Соединение труб производится в два этапа: контактная сварка оплавлением полиэтиленовых кромок труб (для получения герметичности), затем наложение составной муфты на клеевые компаунды для обеспечения осевой и радиальной прочности трубопровода.

Уже уложены и успешно работают на промыслах при высоких давлениях более 200 км трубопроводов из таких труб. В ближайшее время будет организовано производство комбинированных труб большего диаметра.

#### ADVANCED TECHNOLOGIES FOR WELDING THIN-WALLED STRINGER STRUCTURES. A. Ya. Ishchenko, A. A. Bondarev, Andr. A. Bondarev (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Thin stringer panels with stiffeners of differing profile find an increasingly wide application in industry, e.g. in ship building, transport, aircraft and rocket engineering. They are manufactured from high-strength aluminium alloys, which leads to a substantial decrease in weight and provides high strength and rigidity values.

Much experience has been accumulated up to now and several methods are available for the fabrication of structures with stiffeners, welding being the most promising of them. Reported are the examples of using resistance, diffusion and argon-arc welding, as well as highly concentrated heat sources, such as electron and laser beams, for the fabrication of stringer panels. However, with any welding method their fabrication involves problems, the most important of them being ensuring high precision of geometrical shapes and dimensions of finished products.

Investigations are under way for finding new methods for reducing the level of residual welding distortions during welding and their removal after welding.

The most common methods among those aimed at decreasing residual welding distortions of panels with stiffeners are the methods of design and preventive character (rigid fixation of elements welded, reverse deflection or preliminary elastic tension), welding processes and techniques allowing them to be performed at minimum values of heat input and maximum possible welding speed.

ми являются меры конструктивного и предупредительного характера (жесткое закрепление свариваемых элементов, использование приемов обратного выгиба или предварительного упругого растяжения), а также способы сварки и приемы, позволяющие выполнять процесс с минимальными значениями погонной энергии при возможно высокой скорости сварки. С учетом этого разрабатывали различные технологические варианты соединения ребер с листом способом электронно-лучевой сварки, регулировали тепловложение при сварке пропорционально толщине свариваемых элементов, использовали для изготовления макетов сплав АМг6Н и алюминийеволитиевые сплавы марок 1423, 1430 и 1460. После сварки использовали приемы термификации. В ходе исследований сварены тавровые соединения двусторонними угловыми швами, односторонним угловым швом или выполнением прорезного шва проплавлением листа со стороны, обратной расположению ребра. Для оценки влияния каждого из исследуемых факторов на уровень остаточных деформаций макетные образцы сваривали в свободном состоянии без использования оснастки, после чего осуществляли микрометраж формоизменения панелей. Дан пример определения угловой деформации при различных количествах швов, тепловложениях и марок свариваемых сплавов. Представлены результаты и примеры использования приемов сварки панелей прорезными швами, а также данные испытания механических свойств стыковых и тавровых соединений на разрыв и малоцикловую усталость. Результаты исследований позволили разработать оптимизированные рекомендации и маршрутный технологический процесс для промышленного изготовления оребренных стрингерных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов.

**ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ.** А. Я. Ищенко, В. Ф. Демченко, В. П. Будник, С. С. Козлитина (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Разработанная экспертная система аккумулировала знания, практический опыт и данные по технологиям сварки легких сплавов, реализованные в виде баз данных и баз знаний. В состав экспертной системы входят следующие фактографические и графические базы данных: основных материалов; сварных соединений; сварочных материалов; способов сварки; сравнительных характеристик способов сварки.

Модель базы данных способов сварки определена таким образом, что каждому основному материалу ставятся в соответствие допустимые способы сварки. База данных сварочных материалов состоит из имени материала, перечня способов сварки и списка основных материалов, для которых может быть использован данный сварочный материал. База данных сравнительных характеристик способов сварки для каждого способа хранит информацию о плотности металла шва и его внешнем виде, размерах зоны термического влияния, показателях сварочных деформаций, производительности сварки, качестве по рентгеновскому контролю, проплавающей способности, экологической характеристике и показателе свариваемости.

База данных основных материалов содержит ин-

Different technologies for joining stiffeners to panels by electron beam welding were developed on this basis, welding heat input was regulated depending upon the thickness of elements welded, and alloy АМg6N and aluminium-lithium alloys 1423, 1430 and 1460 were tried out to manufacture model samples. Welding was followed by thermal fixation procedures.

The investigations included welding of T-joints with two-sided fillet welds, one-sided fillet welds or slot welds by penetrating the panel on the side reverse to that of location of a stiffener. To evaluate the effect of each of the factors on the level of residual distortions, the model samples were welded using no backing and no fixture. After that the panels were studied to measure microscopic changes in their shape. An example of determination of angular distortion at different number of the welds, different heat inputs and different grades of base materials is given. Results and examples of application of welding of panels using slot welds, as well as data of mechanical tensile and low-cycle fatigue tests of butt and T-joints are presented.

The investigation results allowed development of recommendations and flow charts for the optimized commercial manufacture of stringer panels with stiffeners from high-strength aluminium alloys.

**EXPERT DESIGN SYSTEM FOR TECHNOLOGIES OF WELDING LIGHT ALLOYS.** A.Ya.Ishchenko, V.F.Demchenko, V.P.Budnik, S.S.Kozlitina (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). The new expert system has accumulated knowledge, practical experience and data on the technologies of welding light alloys. The system includes data and knowledge bases. It comprises the following factographic and graphic data bases: for base materials, welded joints, welding consumables, welding methods and comparative characteristics of the welding methods.

The model of the data base for welding methods is arranged so that all suitable welding methods are given to each base material. The base consists of designations of consumables, list of the welding methods and list of base materials for which a given welding consumable can be used.

The data base for comparative characteristics of the welding methods contains information on the following characteristics for each welding method: density of weld metal and its appearance, size of the heat-affected zone, indicator of welding strains, productivity of welding, quality determined by X-ray inspection, penetrating power, environmental characteristic and indicator of weldability.

The data base for base materials contains information on base materials of the class of light alloys which are joined by the arc welding methods. This information

формацию об основных материалах из класса легких сплавов, которые соединяются с помощью дуговых методов сварки. Эта информация состоит из данных о системе легирования и марке основного металла с использованием буквенного и (или) числового кода сплава.

База данных сварных соединений включает информацию (в соответствии с ГОСТ) о формах разделки сварного шва для стыковых, угловых, тавровых и нахлесточных соединений, о допустимых способах сварки для данной формы разделки, а также о геометрических ограничениях на толщину металла и длину шва, заданных для каждого допустимого способа сварки.

Для создания удобного интерфейса пользователя актуализирована графическая база данных форм разделок сварного шва, представляющая собой набор файлов в графическом формате, в которых сохраняется информация о формах разделок шва для различных типов сварных соединений (28 разделок стыковых соединений, 9 тавровых, 14 угловых и 2 нахлесточных).

Информация о режимах сварки содержится в базе знаний, реализованной в виде набора расчетных модулей для определения параметров режима сварки в зависимости от ее способа, толщины металла и формы разделки шва. Параметрические уравнения базы знаний построены на основе регрессионной обработки массивов экспериментальной информации.

На первом этапе работы экспертной системы задается система легирования основного металла, толщина свариваемого материала и длина шва. Эти параметры используются для определения возможных вариантов разделки металла шва и допустимых способов сварки. При выборе рационального способа сварки, в наибольшей степени соответствующего заданным критериям качества сварного соединения, пользователь имеет возможность обратиться к системе информационной поддержки, которая предоставляет сравнительные характеристики допустимых способов сварки по перечисленным выше показателям качества. В зависимости от выбранного способа сварки компьютерная система дает рекомендации по сварочным материалам (присадочной проволоке, защитному газу, неплавящемуся электроду) и режимам процесса. Итогом совместной работы пользователя и компьютера является выходной документ (технологическая карта), в котором отражены исходная информация и рекомендации экспертной системы по технологии сварки.

Экспертная система может быть использована на предприятиях машиностроительного комплекса, в технологических и конструкторских бюро, а также в высших учебных заведениях при подготовке инженеров сварочной специальности.

**СВАРИВАЕМОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ.** Е. Н. Каблов, В. И. Лукин, Л. И. Сорокин (ГП ГИЦ ВИАМ, г. Москва, РФ). Свариваемость жаропрочных сплавов определяется склонностью к образованию трещин при сварке и термической обработке. Исходя из опыта изготовления сварных конструкций и результатов лабораторных исследований предлагается оценивать сплавы следующим образом: хорошо; удовлет-

вcludes data on the alloying system and grade of the base metal using alphabetic and/or numerical code for alloy designation.

The data base for welded joints includes information (according to GOST) on groove preparation for butt, fillet, T- and overlap joints, on suitable welding methods for a given groove preparation and geometrical restrictions on metal thickness and weld length assigned for each applicable welding method.

There is a graphical data base for weld groove preparations, which is intended to serve as the user's friendly interface. This data base is a set of files in a graphical format, which contain information on different types of groove preparation for different types of welded joints (28 types of groove preparation for butt joints, 9 - for T-joints, 14 - for fillet and 2 - for overlap joints).

The information on welding conditions is contained in the knowledge base realized in the form of calculation modules to identify welding parameters depending upon the welding method, metal thickness and groove preparation. Parametric equations of the knowledge base are developed on the basis of regression processing of arrays of the experimental information.

Stage 1 of operation of the expert system includes assignment of the alloying system of a base metal, thickness of the base metal and the weld length. These parameters are used to identify possible variants of groove preparation and suitable welding methods. Upon selecting a rational welding method which is most suitable for the preset criteria of quality of a welded joint, the user can address the information support system which provides comparative characteristics of the suitable welding methods by the above quality indicators. Depending upon the welding method selected, the computer system gives recommendations for welding consumables (filler wire, shielding gas, non-consumable electrode) and process parameters. The end product of interaction between the user and computer is an output document (flow chart) which contains the source information and recommendations of the expert system for the welding technology.

The expert system can be used at machine building enterprises, technology and design bureaus, as well as at higher education institutions for training welding engineers.

**WELDABILITY OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS USED IN AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES.** E. N. Kablov, V. I. Lukin, L. I. Sorokin (VIAM, Moscow, Russia). Weldability of heat-resistant alloys depends upon their susceptibility to cracking during welding and heat treatment. Based on the experience of fabrication of welded structures and results of laboratory investigations, it is suggested that alloys should be estimated as having good, satisfactory weldability, having satisfactory

ворительно; удовлетворительно свариваемые, но склонные к термическим трещинам; ограниченно свариваемые.

К хорошо свариваемым относятся жаростойкие гомогенные сплавы ХН78Т (ЭИ435), ХН75МБТЮ (ЭИ602), ХН60В (ЭИ868), отличающиеся низкой склонностью к образованию горячих трещин, не склонные к термическим трещинам, не имеющие ограничений к применению электродов при ручной дуговой сварке, сварочных проволок при аргоно-дуговой сварке, режимов электронно-лучевой сварки и к размеру зерна в сплавах.

К удовлетворительно свариваемым относятся жаропрочные дисперсионно-твердеющие железохромоникелевые ХН3ОВМТ (ЭИ437), ХН45МВТЮБР (ЭП718) и никелевые ХН50ВТЮБ (ЭП648, ВХ4Л), ХН65ВМБЮ (ЭП914) сплавы, содержащие до 2,7 % алюминия, до 3,7 % титана и до 10...12 %  $\gamma$ -фазы, не склонные к образованию термических трещин. Склонность к образованию горячих трещин определяется свойствами, состоянием сплава и типом применяемого полуфабриката.

Для снижения склонности к образованию трещин рекомендуется сваривать эти сплавы в закаленном состоянии, в качестве присадок использовать электроды и сварочные проволоки, у которых деформационная способность более высокая, чем у основного металла, при электронно-лучевой сварке ограничивать скорость процесса, для всех способов сварки ограничивать размер зерна баллом 4.

Следующую группу составляют дисперсионно-твердеющие никелевые сплавы ХН68ВМТЮК (ЭП693), ХН62ВМЮТ (ЭП708), ВЖЛ-14, ХН56ВМЮ (ЭП199), ХН50МВКТИОР (ЭП99), содержащие 2,7...3,5 % алюминия, 3,7...5,0 % титана и около 18...20 %  $\gamma$ -фазы, умеренно склонные к образованию горячих и термических трещин. Образование горячих трещин снижают с помощью технологических и металлургических мер, рекомендуемых для предыдущей группы. На практике растрескивание этих сплавов при термообработке имеет место на сварных узлах с высоким уровнем остаточных напряжений. Уменьшить растрескивание можно путем оптимизации технологии сварки, применения присадочных материалов из гомогенных сплавов и термообработки по схеме закалка-сварка-закалка-старение. Для сплавов с повышенным содержанием алюминия и титана рекомендуется перед сваркой проводить перестаривание сплавов.

К ограниченно свариваемым относятся сплавы марки ЖС6, содержащие более 3,5 % алюминия, свыше 5 % титана и более 22 %  $\gamma$ -фазы, характеризующиеся высокой склонностью к образованию трещин при сварке и термообработке. Улучшить их свариваемость можно путем длительного многоступенчатого перестаривания или применения высокотемпературного сопутствующего подогрева свыше 1000 °C.

Оценка свариваемости сплавов в зависимости от содержания в них алюминия, титана и  $\gamma$ -фазы связана с тем, что с увеличением их количества происходит повышение жаропрочности, релаксационной стойкости и снижение теплопроводности сплавов, которые вызывают возрастание напряжений при сварке и термообработке. Экспериментально установлено, что основными факторами, влияющими на

weldability but susceptible to thermal cracking and those having limited weldability.

Alloys having good weldability include heat-resistant homogeneous alloys KhN78T (EI435), KhN5MBTYu (EI602) and KhN60V (EI868), which are characterized by low susceptibility to hot cracking and no sensitivity to thermal cracking, and which have no restrictions on the use of electrodes in manual arc welding, welding wires in argon-arc welding, parameters of electron beam welding and size of grain of alloys.

Alloys having satisfactory weldability include heat-resistant precipitation-hardening iron-chrome-nickel alloys KhN30VMT (EI437), KhN45MVTYuBR (EP718) and nickel alloys KhN50VTYuB (EP648, VKh4L), KhN65VMTYu (EP914) containing up to 2.7 % aluminium, up to 3.7 % titanium and up to 10-12 %  $\gamma$ -phase. These alloys are insensitive to thermal cracking. Their susceptibility to hot cracking is determined by properties, state of an alloy and type of a semi-finished product used.

To decrease susceptibility to cracking, it is recommended to weld these alloys in a quenched state and use as the fillers such electrodes and welding wires which have higher deformability than base metal. In the case of employing electron beam welding, it is advisable to limit the process rate. In addition, for all welding methods it is recommended that the grain size be limited to point 4.

The next group of alloys includes precipitation-hardening nickel alloys KhN68VMTYuK (EP693), KhN62VMTYuT (EP708), VZhL-14 KhN56VMTYu (EP199), KhN50MVKTYuR (EP99), which contain 2.7-3.5 % aluminium, 3.7-5.0 % titanium and about 18-20 %  $\gamma$ -phase. They are moderately sensitive to hot and thermal cracking. Formation of hot cracks is normally reduced by technology and metallurgy measures similar to those recommended for the previous group of alloys. In practice, cracking of these alloys during heat treatment occurs in welded connections with a high level of residual stresses. Cracking can be decreased by optimization of the welding technology, the use of filler materials of homogeneous alloys and heat treatment by the "quenching-welding-quenching-ageing" procedure. For alloys with an increased aluminium and titanium content, it is recommended that prior to welding they be subjected to overageing.

Alloys with a limited weldability include alloys of the ZhS6 grade, which contain more than 3.5 % aluminium, more than 5 % titanium and over 22 %  $\gamma$ -phase. They are characterized by a high susceptibility to cracking during welding and heat treatment. Their weldability can be improved by long-time many-stage overageing or using high-temperature concurrent heating to more than 1000 °C.

Evaluation of weldability of alloys depends upon aluminium, titanium and  $\gamma$ -phase contained in them. An increase in the content of the above elements leads to an increase in heat resistance, relaxation resistance and decrease in thermal conductivity, which in turn causes an increase in stresses during welding and heat treatment. It is experimentally established that the main factors affecting cracking during welding and heat treatment are the level and rate of growth of stresses, as well as relaxation resistance of alloys and their welded joints.

Hot crack resistance of all alloys during welding can be improved by using vacuum-induction (VIM) or vacuum-

образование трещин при сварке и термообработке, являются уровень и темп нарастания напряжений, а также релаксационная стойкость сплавов и сварных соединений.

Стойкость против образования горячих трещин при сварке всех сплавов улучшается за счет перехода от открытой выплавки к вакуумно-индукционной (ВИ), вакуумно-дуговой (ВД) или в результате применения двойного переплава (ВИ + ВД), что связано со снижением в сплавах содержания кислорода и неметаллических включений. Применение при выплавке отходов на 15...20 % снижает стойкость против образования горячих трещин.

Литейные сплавы, имеющие по сравнению с деформированными большую структурную и химическую неоднородность, отличаются меньшей стойкостью против образования горячих трещин, особенно в околошовной зоне. Их свариваемость можно улучшить путем выплавки на чистых шихтовых материалах и отливки с направленной кристаллизацией.

**ДУГОКОНТАКТНАЯ ПРИВАРКА ДЮБЕЛЕЙ.** Д. М. Калек (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Большое количество крупногабаритных металлоконструкций нуждается в защитных и эксплуатационных покрытиях. Однако при этом возникает проблема удержания покрытия на большой площади. Оптимальным способом решения этой проблемы является приварка дюбелей. При бетонировании металлических поверхностей следует предусмотреть их защиту от коррозии.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана технология ручной механизированной приварки дюбелей диаметром до 20 мм к металлическим листам толщиной от 5 мм через оцинкованные листы толщиной 0,8...1,0 мм с применением керамических шайб. При этом и дюбели, и оцинкованные листы вместе прочно привариваются к металлоконструкции. Для реализации указанной технологии применены блок управления процессом дугоконтактной сварки и соответствующий источник тока, разработанные в Институте электросварки, а также сварочный пистолет РМН-80 фирмы HBS (Германия), в который были внесены некоторые изменения. Фирма поставила также дюбели и керамические шайбы, производство которых в Украине в настоящее время экономически нецелесообразно.

Технология и оборудование, поставленное Институтом электросварки, было использовано для приварки дюбелей перед бетонированием при строительстве большепролетного гаражного помещения.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, А ТАКЖЕ СИСТЕМ ГАЗОПИТАНИЯ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ.** О. Е. Капустин (ФГУП «ВНИИавтогенмаш», г. Москва, РФ). Способы газопламенной обработки металлов (ГОМ) объединяют свыше 30 широко применяемых технологических процессов, основой которых является использование источников нагрева высокотемпературного пламени. Номенклатура оборудования и аппаратуры для ГОМ насчитывает более тысячи видов и является потенциально пожаро- и взрывоопасной.

arc (VAM) melting instead of open melting (OM), or by using double remelting (VI+VA), which is associated with a decrease in the content of oxygen and non-metallic inclusions in alloys. The use of scrap for melting leads to a decrease of 15–20 % in hot crack resistance.

Cast alloys, which have a higher structural and chemical heterogeneity than wrought alloys, are characterized by lower hot crack resistance, especially in the HAZ. Their weldability can be improved by melting using pure charge materials or by oriented solidification casting.

#### ARC-CONTACT WELDING OF EXPANSION BOLTS.

D.M.Kaleko (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Many large-sized metal structures require protective and functional coatings. However, this involves the problem of retention of a coating on a large surface area. The optimal method for resolving this problem is to weld expansion bolts. Prior to placing concrete on metal surfaces it is necessary to protect them from corrosion.

The E.O.Paton Electric Welding Institute developed a technology for manual mechanized welding of expansion bolts up to 20 mm in diameter to metal sheets with a thickness from 5 mm through zinc-plated sheets 0.8–1.0 mm thick using ceramic washers. In this case both expansion bolts and zinc-plated sheets are strongly joined to a metal structure.

This technology is realized using the arc-contact welding control unit and corresponding power supply developed by the Institute, as well as the HBS (Germany) welding gun RMN-80 with some modifications made in it. The Company supplied also expansion bolts and ceramic washers the production of which now in Ukraine is not cost effective.

The technology and equipment supplied by the E.O.Paton Electric Welding Institute were employed for welding expansion bolts prior to concrete placement for construction of a large-span garage building.

#### SCIENTIFIC-AND-TECHNICAL PRINCIPLES FOR ASSURING RELIABILITY AND SAFETY OF WELDING EQUIPMENT AND GAS FEED SYSTEMS USED FOR FLAME TREATMENT OF METAL STRUCTURES.

O.E.Kapustin (VNIIAvtogenmash, Moscow, Russia). Methods of flame treatment of metals (FTM) include more than 30 widely applied processes based on the use of high-temperature flame heat sources. The range of the FTM equipment is very wide and includes thousands of types. This equipment is fire and explosion hazardous. Analysis of causes of an increasing number of accidents associated with performing welding operations allows a

Анализ причин участвовавших в последние годы аварий оборудования и несчастных случаев на производстве при выполнении газосварочных работ позволяет утверждать, что задача обеспечения безопасности при ГОМ является весьма актуальной.

Ее решение осуществлялось на основе анализа результатов комплексных исследований процессов горения, распротранения и гашения пламени, сварочных смесей, принципов функционирования защитных устройств, моделирования оптимальных систем безопасности и конструктивно-технологических схем элементов оборудования, коммуникаций и источников газопитания.

Исследования процессов фильтрационного горения сварочных смесей позволило определить способы, средства и оптимальные параметры прерывания (отсекания), обеспечивающие условия, исключающие возможность вторичного воспламенения горючих смесей в защищаемом объекте.

Серийные экспериментальные стендовые и полевые исследования позволили с высокой точностью установить быстродействие всевозможных защитных систем (устройств) мембранного и поршневого типов, определить соответствующие закономерности и расчетные зависимости инженерно-прикладного характера, а также разработать комплекс научно обоснованных технических требований к конструктивно-технологическим решениям различных средств защиты сварочного оборудования и систем газопитания.

На основе обобщенной базы статистических данных и примененного «HAZOP-анализа» произведено построение логико-вероятностных схем возникновения аварий способом «деревьев отказов», содержащих все значимые факторы и их взаимодействия (выход из строя запорной и регулирующей арматуры, коммуникаций, приборов, блокировок, неполадки сварочного и режательного оборудования и т. д.), с учетом информации об относительно возможных ошибках операторов (сварщиков), полученной в результате анализа системы человек-машина для процессов ГОМ. Эти результаты позволили с высоким уровнем достоверности определить зоны поражения для всех видов аварий (взрывы горючих сварочных смесей, разлет осколков, факельное горение струи газов и пр.), характерных для основных технологических процессов сварки и резки, применяемых при производстве, монтаже и демонтаже сварных конструкций. Определены требования к надежности разработанных систем защиты, обеспечивающих приемлемый уровень риска и оптимальное сочетание защитных устройств, гарантирующие условия достаточности уровня безопасности систем газопитания.

Результаты работ защищены четырьмя патентами; разработаны 36 видов защитных устройств; подготовлена система соответствующей нормативно-технической документации (ГОСТ Р, РД, ПМ, МУ).

**ВЛИЯНИЕ УСИЛИЯ СЖАТИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОЙ ТОЧКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ.** В. И. Колосов, П. А. Гореликов, Р. А. Мусин (Гос. техн. ун-т, г. Пермь, РФ; АО «Пермские моторы», г. Пермь, РФ). Усилие сжатия электродов при контактной точечной сварке является одним из основных параметров, влияющих на размеры и форму сварной точки. Как показали наши исследова-

ния, проблема обеспечения безопасности ФТМ является чрезвычайно острой.

Эта проблема была решена на основе анализа результатов комплексных исследований процессов горения, распространения и тушения пламени, сварочных смесей, принципов функционирования защитных устройств, моделирования оптимальных систем безопасности и проектно-технологических схем элементов оборудования, сервисных линий и источников газа.

Исследования процессов фильтрационного горения сварочных смесей позволило определить способы, средства и оптимальные параметры прерывания (отсекания), обеспечивающие условия, исключающие возможность вторичного воспламенения горючих смесей в защищаемом объекте.

Серийные экспериментальные стендовые и полевые исследования позволили с высокой точностью установить быстродействие всевозможных защитных систем (устройств) мембранного и поршневого типов, определить соответствующие закономерности и расчетные зависимости инженерно-прикладного характера, а также разработать комплекс научно обоснованных технических требований к конструктивно-технологическим решениям различных средств защиты сварочного оборудования и систем газопитания.

На основе обобщенной базы статистических данных и примененного «HAZOP-анализа» произведено построение логико-вероятностных схем возникновения аварий способом «деревьев отказов», содержащих все значимые факторы и их взаимодействия (выход из строя запорной и регулирующей арматуры, коммуникаций, приборов, блокировок, неполадки сварочного и режательного оборудования и т. д.), с учетом информации об относительно возможных ошибках операторов (сварщиков), полученной в результате анализа системы человек-машина для процессов ГОМ. Эти результаты позволили с высоким уровнем достоверности определить зоны поражения для всех видов аварий (взрывы горючих сварочных смесей, разлет осколков, факельное горение струи газов и пр.), характерных для основных технологических процессов сварки и резки, применяемых при производстве, монтаже и демонтаже сварных конструкций. Определены требования к надежности разработанных систем защиты, обеспечивающих приемлемый уровень риска и оптимальное сочетание защитных устройств, гарантирующие условия достаточности уровня безопасности систем газопитания.

Результаты работ защищены четырьмя патентами; разработаны 36 видов защитных устройств; подготовлена система соответствующей нормативно-технической документации (ГОСТ Р, РД, ПМ, МУ).

**EFFECT OF ELECTRODE COMPRESSION FORCE ON FORMATION OF THE WELD NUGGET IN RESISTANCE WELDING.** V.I. Kolosov, P.A. Gorelikov, R.A. Musin (Perm State Technical University, Perm, Russia; Stock-Holding Company "Perm Motors", Perm, Russia). The electrode compression force in spot resistance welding is one of the basic parameters affecting the shape and size of the weld nugget. As proved by our investigations,

дования, не только уровень усилия сжатия, но и программированное изменение его непосредственно в процессе сварки оказывают существенное влияние на формообразование литого ядра. Проведенные эксперименты позволили установить некоторые зависимости, характеризующие количественное соотношение увеличения объема расплавленного металла ядра и характера регулирования усилия сжатия. Так, например, при достаточно «мягких» режимах сварки стали марки 12Х18Н10Т толщиной (2 + 2) мм и программированном усилии сжатия при прочих равных условиях увеличение объема литого ядра достигало 65 %. При «жестких» режимах этот показатель был несколько меньшим. Одновременно с увеличением размеров ядра повышается также прочность соединения. При испытаниях на срез образцов из стали марки 30ХГСА толщиной (2 + 2) мм, сваренных обычным способом и с программируемым усилием сжатия, отмечалось повышение прочности последних в среднем на 20 % при одинаковых размерах точки.

Анализ опытных данных позволил сделать следующие выводы:

- на формирование сварного соединения при контактной точечной сварке существенное влияние оказывает не только уровень, но и характер приложения сварочного усилия;
- процесс контактной точечной сварки следует рассматривать не как сугубо тепловой, а как термомеханический процесс, включающий деформационные явления;
- сходство температурных и деформационных полей свидетельствует о их связности в условиях контактной сварки;
- путем изменения усилия сжатия электродов непосредственно в процессе сварки можно эффективно влиять на процесс развития деформации, а, следовательно, и на процесс формирования температурного поля, что позволяет в конечном итоге получить более развитое литое ядро.

**РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ СЖАТОЙ ДУГОЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЗАГотовок С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ТЕПЛОВОДОМ.** А. Н. Корниенко, Н. А. Макаренко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Основным преимуществом плазменно-дуговой сварки является повышенная проплавающая способность, что объясняется концентрацией тепловой энергии в активных пятнах и столбе дуги, а также давлением плазменно-газового потока на металл ванны. В определенном диапазоне действия этих факторов процесс сварки осуществляется со сквозным проплавлением с выходом потока через дно ванны, что ограничивает применение подкладки. От ширины (или диаметра) образующегося с обратной стороны ванны отверстия зависит размер провисания металла ванны и, следовательно, форма шва. Отклонение одного из параметров сборки и режима сварки может привести к дефекту несплавления кромок. Были выполнены исследова-

не только уровень усилия сжатия, но и его программированное изменение непосредственно в процессе сварки оказывают существенное влияние на формирование литого ядра. Проведенные эксперименты позволили установить некоторые зависимости, характеризующие количественное соотношение увеличения объема расплавленного металла ядра и характера регулирования усилия сжатия. Так, например, при достаточно «мягких» режимах сварки стали марки 12Х18Н10Т толщиной (2 + 2) мм и программированном усилии сжатия при прочих равных условиях увеличение объема литого ядра достигало 65 %. При «жестких» режимах этот показатель был несколько меньшим. Одновременно с увеличением размеров ядра повышается также прочность соединения. При испытаниях на срез образцов из стали марки 30ХГСА толщиной (2 + 2) мм, сваренных обычным способом и с программируемым усилием сжатия, отмечалось повышение прочности последних в среднем на 20 % при одинаковых размерах точки.

Similar investigations using samples of heat-resistant and high-temperature steels, stacks of several sheets of the same and different thickness, etc. also showed an increase in volume of the nugget metal in the case of using variable force at the electrodes.

Analysis of the experimental data allowed the following conclusions:

- formation of a welded joint in spot resistance welding is fundamentally affected not only by the level but also by the character of the applied welding force;
- spot resistance welding should be regarded not as a purely thermal process but as a thermomechanical process that involves deformation phenomena;
- similarity of temperature and deformation fields is indicative of the relationship between them under conditions of resistance welding;
- the process of development of deformation and thus the process of formation of the temperature field can be substantially affected by varying the electrode compression force directly during the welding process, which leads to formation of a more developed weld nugget.

**SOLUTION OF THE PROBLEM OF CONSTRICTED ARC WELDING OF STRUCTURES MADE FROM BILLETS WITH ASYMMETRIC HEAT REMOVAL.** A. N. Kornienko, N. A. Makarenko (E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). The main advantage of plasma-arc welding is an increased penetrating power, which is attributable to concentration of thermal energy in the active spots and arc column, as well as to pressure the plasma-gas flow exerts on the weld pool metal. Within a certain range of action of these factors the welding process results in through penetration, making the flow go out through the pool bottom. Under such conditions the use of a backing plate involves difficulties. The size of sag of the pool metal and thus the weld shape depend upon the width (or diameter) of a hole formed in the back surface of the pool. Deviation of one of the parameters of assembly or welding can lead to a defect in the form of lack of fusion of the weld edges. Investigations were conducted to study the possibility of elimi-

ния, направленные на исключение дефектов формирования шва при сохранении высокой проплавляющей способности, а также с целью расширения типов свариваемых соединений и форм заготовок. Для удержания металла ванны или помощи формирующих подкладок предложено выполнять процесс сварки с отклонением оси горелки таким образом, чтобы плазменно-газовый поток, выходящий со дна ванны, был направлен вперед по канавке подкладки. Таким образом, удалось изменить требуемый допуск к зазору между кройками. В частности, при сварке стыковых швов протяженных полотнищ и обечаек из АМг6 толщиной 6...10 мм размер зазора может колебаться от 0 до 3 мм.

Возможность бездефектного формирования шва при повышенной тепловой мощности дуги и напоре потока позволила применить процесс при сварке аппаратных зажимов (контактных наконечников) для линий высоковольтных передач. Это изделие состоит из двух заготовок — омедненной алюминиевой пластины толщиной 6 мм и алюминиевой штампованной детали Т-образной формы толщиной, превышающей пластину в 2 раза. Приварить пластину к полке шириной 10...12 мм (штампованной детали) удалось плазменной дугой с программированным плавлением и изменением сварочного тока от 150 А в начале шва до 220 А к середине и до 120 А к концу соединения. Длина шва одной детали составляла 100 мм. В производственных условиях в кондукторе собирают и сваривают «одним» протяженным швом сразу 20 аппаратных зажимов.

При плазменно-дуговой сварке со сквозным проплавлением на переменном токе оксидная пленка разрушается как за счет катодного распыления, так и механически — под напором плазменно-газового потока. Это преимущество процесса использовано при изготовлении соединений с технологическими буртами. В частности, такое соединение используется при вварке фланцев люков в баки в тех случаях, когда доступ к соединению с обратной стороны невозможен. Разработана программа изменения параметров режима с учетом варьирования в процессе сварки теплонасыщения и зазора стыка.

**СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ МЕСТНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОВОДОВ БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ.** П. М. Корольков (ОАО «ВНИИмонтажспецстрой», г. Москва, РФ). Местная термообработка сварных соединений трубопроводов больших диаметров (1200...2000 мм), а также (в некоторых случаях) сосудов тех же диаметров, работающих под давлением в полевых условиях, является технологической операцией, требующей сложного оборудования и высокой квалификации персонала. Для такой термообработки возможно применение индукционного нагрева токами средней частоты (1000...2500 Гц), что тоже требует сложного и дорогостоящего оборудования. Кроме того, в полевых условиях его использование затруднительно в связи с необходимостью применения водяного охлаждения.

В настоящее время в системе РАО «Газпром» при модернизации (рекуперации) газокompрессорных станций местной термообработке по режиму высокого отпуска подвергают сварные соединения труб размером 1220(16...22) мм из стали марки 12ХМ

nation of the weld formation defects by maintaining the penetrating power at a high level, as well as to expand the range of welded joints and shapes of billets.

To maintain the pool metal using the forming backing plates, it was suggested that the welding process should be performed with a deviation of the torch axis in such a way that the plasma-gas flow going out from the pool bottom is directed forward along the groove in the backing plate. This helped change the required allowance for the gap between the edges. In particular, in butt welding of extended panels and shells from alloy АМГ6 6-10 mm thick the gap size can vary from 0 to 3 mm.

The possibility of the defect-free weld formation at an increased heat power of the arc and pressure of the flow allowed the process to be employed for welding terminals (contact clamps) of the high-voltage transmission lines. Such a piece consists of two billets: copper-covered aluminium plate 6 mm thick and T-shaped aluminium stamped piece having thickness 2 times as large as that of the plate. The plate was welded to the flange 10-12 mm thick (stamped penetration) by the plasma-arc method with a programmed velocity and variation of the welding current from 150 A at the weld beginning to 220 A in the middle and then to 120 A at the end of the welded joint. The weld on one piece is 100 mm long. Under industrial conditions 20 terminals at a time are assembled in a rig and welded with one extended weld.

Plasma-arc welding with through penetration at the alternating current results in break of an oxide film caused both by cathode sputtering and mechanical effect of pressure of the plasma-gas flow. This advantage of the process was used for making the joints with technological shoulders. In particular, such a joint is utilized in welding port flanges to tanks in such cases where there is no access to the back side of the joint. The program of variation of the process parameters allowing for variations in heat saturation and joint gap during welding is available.

#### ADVANCED METHODS FOR LOCAL HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS IN LARGE-DIAMETER PIPELINES.

P.M.Korolkov (Open Stock-Holding Company "VNIImontazhspeystroj" Moscow, Russia). Local heat treatment of welded joints in pipelines of large diameters (1200-2000 mm) and pressure vessels (in some cases) of similar diameters, performed under field conditions, is a complicated technological operation which requires a sophisticated equipment and highly skilled personnel. Such treatment can be realized using induction heating at medium-frequency currents (1000-2500 Hz), which also requires sophisticated and expensive equipment. In addition, its application under field conditions is complicated by the need of using water cooling.

At present the Russian Joint-Stock Company "Gazprom" is in process of upgrading (recuperation) of their gas-pumping stations. For this they subject welded joints in pipes 1220 (16-22) mm made from steel 12KhM supplied from Italy to local heat treatment by the high tempering conditions. In Kazakhstan, in construction of the Zhanazholsky Gas-Processing Plant, to increase corrosion resistance of gas pipelines local heat treat-

итальянской поставки. В Казахстане при строительстве Жанажольского газоперерабатывающего завода с целью повышения коррозионной стойкости местную термообработку по режиму высокого отпуска проводят для сварных соединений газопроводов размером 1420(14...22) мм из стали марки 09Г2С.

Для выполнения указанных работ в ОАО «ВНИИмонтажпечстрой» разработана технология местной термообработки сварных соединений трубопроводов диаметром 1220...1420 мм с использованием трех секций электронагревателей комбинированного действия КЭН-4-3 единичной мощностью 23 кВт (ток 300...330 А), параллельно присоединяемых к источнику питания — сварочному трансформатору ТДФЖ-1002. Разработанная технология обеспечивает равномерность нагрева по окружности и длине сварного соединения при удельной мощности нагрева 5...6 Вт/см<sup>2</sup>, значительно уменьшает тепловые потери.

На втором этапе опытных работ разработаны две технологии термообработки по режиму высокого отпуска с нагревом до 600 °С для сварных соединений трубопроводов диаметром 1620...2020 мм с толщиной стенки до 25 мм. По одной технологии 4-6 секций КЭН-4-3 параллельно присоединяют к источнику питания (сварочному трансформатору ТДФЖ-2002), по другой, — используют два трансформатора ТДФЖ-1002, к каждому из которых параллельно подсоединяют по две-три секции КЭН-4-3. При этом обеспечивается удельная мощность 6...7 Вт/см<sup>2</sup>, необходимая равномерность нагрева по окружности и длине сварного соединения, снижаются тепловые потери.

Применение трансформаторов ТДФЖ-1002 и ТДФЖ-2002 позволяет легко автоматизировать процесс термообработки с использованием программных устройств типа РИТ-26 и др.

Данные технологии обеспечивают высокое качество местной термообработки случае выполнения работ в полевых условиях, а также при монтажно-строительных и ремонтных работах в различных отраслях промышленности.

#### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЦИКЛОКОНВЕРТОРОВ.

А. Е. Коротынский (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона г. Киев, Украина). Обеспечение высокого качества сварных конструкций неразрывно связано с использованием современного технологического оборудования, способного обеспечить требуемый уровень формирования сварных соединений во всех пространственных положениях. Такое оборудование должно обеспечивать плавную (в ряде случаев программную) регулировку сварочного тока, а также его модуляцию, что особенно необходимо при работах в вертикальном и потолочном положениях. Поскольку процесс создания сварных конструкций очень часто происходит в полевых условиях, когда для работы применяются мотор-генераторы, сварочное оборудование должно отличаться высоким КПД и cosφ. Этим требованиям более всего соответствуют сварочные источники на основе индуктивно-емкостных преобразователей.

Схема одного из возможных вариантов такого сварочного аппарата разработана в ИЭС им. Е. О. Па-

мент by the high tempering conditions is done to welded joints of pipes 1420 (14-22) mm in diameter made from steel 09G2S.

To perform the above works, VNIIMontazhpetsstroi developed a technology for local heat treatment of welded joints in pipelines 1220-1420 mm in diameter using three sections of combined-action electric heaters KEN-4-3 with a unit capacity of 23 kW and current of 300-330 A, which are connected in parallel to a power supply, i.e. welding transformer TDFZh-1002. The technology developed provides a uniform heating on the circumference and along the length of a welded joint at a specific heating power of 5-6 W/cm<sup>2</sup> and leads to a substantial decrease in heat losses.

At the second stage of experimental works two technologies for heat treatment by the high tempering conditions, providing heating to 600 °C, were developed for welded joints in pipelines 1620-2020 mm in diameter with a wall thickness of up to 25 mm. According to the first technology 4-6 sections of KEN-4-3 are connected in parallel to the power supply (welding transformer TDFZh-2002), and according to the second technology two transformers TDFZh-1002 are used, and 2-3 sections of KEN-4-3 are connected in parallel to each of them. This provides a specific power of 6-7 W/cm<sup>2</sup>, desirable uniformity of heating on the circumference and along the length of a welded joint, as well as decrease in heat losses.

The use of transformers TDFZh-1002 and TDFZh-2002 makes the process of heat treatment easy to automate using program devices of the RIT-26 type, etc.

These technologies ensure the high quality of heat treatment performed under field conditions, as well as in erection-construction and repair operations in different industries.

#### EQUIPMENT BASED ON RESONANCE CYCLOCONVERTERS FOR ARC WELDING. A. E. Korotynsky (E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Ensuring the high quality of welded structures is strongly related to the use of advanced process equipment capable of providing the required level of formation of welded joints in all spatial positions. This equipment should provide a smooth (programmed in some cases) regulation of the welding current and its modulation, which is especially important for operations done in vertical and overhead positions. As the process of fabrication of welded structures is very often performed under field conditions, where motor generators are used for operation, welding equipment should be characterized by a high efficiency and cosφ. These requirements are met to the highest extent by welding power supplies based on induction-capacitance transducers.

The E. O. Paton Electric Welding Institute developed one of the alternative designs of a welding device, which is based on a cycloconverter circuit. It allows the operating frequency to be increased three times (150 Hz). The welding transformer (WT) is made with an increased

тона. В ее основу положена схема циклоконвертора, позволяющая увеличить рабочую частоту в три раза (150 Гц). Сварочный трансформатор (ТС) выполнен с увеличенным магнитным рассеиванием благодаря разнесению первичных ( $w_{1a}$ ,  $w_{1b}$ ,  $w_{1c}$ ) и вторичной ( $w_2$ ) обмоток на разных стержнях. Первичные обмотки подключаются к трехфазной питающей сети через фазные регуляторы (ФР), включенные по схеме звезды. Коммутация режимов работы ФР, а также регулирование сварочного тока осуществляются блоком управления (БУ). Основной ток определяется емкостным реактором, последовательно включенным во вторичный контур. Модуляция сварочного тока происходит по цепи модулирующая емкость — электронный ключ, подключенный к блоку управления через модулятор.

Принцип умножения частоты сварочного тока следующий. БУ формирует команды управления коммутационными элементами ФР таким образом, что в каждый момент времени только одна из первичных обмоток оказывается подключенной к питающей сети. Следовательно, угол включения по каждой половине должен составлять  $\alpha \geq 120^\circ$ . Среднеквадратическое значение напряжения, действующее во вторичном контуре, определяется выражением

$$U_2 = 3U_m k_{tr} \sqrt{0,5 - \tau_j + (\sin 4 \pi \tau_j)/4\pi},$$

где  $U_m$  — напряжение одной из фаз;  $k_{tr}$  — коэффициент трансформации ТС;  $\tau_j$  — параметр, определяемый отношением  $\tau_j = t_j/T$  ( $t_j$  — продолжительность включения, период напряжения сети).

В результате такой последовательной коммутации по всем фазам во вторичной цепи наводится напряжение  $U_2$  по форме, близкой к треугольнику, а по частоте, в три раза превышающее частоту питающей сети. В этой связи площадь сечения магнитопровода ТС может быть сокращена в три раза. Также уменьшается расход меди, что облегчает массу трансформатора в 1,8...2,0 раза.

Использование резонанса напряжений во вторичном контуре позволило обеспечить достаточно устойчивое горение сварочной дуги при напряжениях холостого хода в диапазоне 25...38 В. Сварочный ток при этом изменяется в пределах 40...200 А. Максимальный ток потребления по каждой из фаз не превышал 9 А, а при коротком замыкании дугового промежутка уменьшался до 6,5 А. Коэффициент мощности при максимальном токе соответствовал значению  $\geq 0,95$ . Масса макета испытанного устройства не превышала 13 кг.

**УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ И СТРУКТУРОЙ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ НЕКОМПАКТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ.** О. Г. Кузьменко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Широко используемая на предприятиях Украины для штампов горячего деформирования сталь марки 5ХНМ имеет недостаточную теплостойкость, а также низкий уровень прочности и износостойкости при повышенных температурах, что, в конечном итоге, приводит к низкой стойкости инструмента. Проблема усугубляется тем, что в некоторых штампах, имеющих глубокую гравюру, отдельные ее элементы подвергаются различным видам изнашивания: в верхней части гра-

matic dissipation owing to separation of primary ( $w_{1a}$ ,  $w_{1b}$ ,  $w_{1c}$ ) and secondary ( $w_2$ ) windings on different cores. Primary windings are connected to a three-phase supply mains via phase regulators (PR) connected by the star connection diagram. Switching of the operational modes of PR and regulation of the welding current are provided by the control unit (CU). The base current is determined by the capacitor reactor, which is connected in series to the secondary circuit. Modulation of the welding current occurs in the circuit "modulating capacitor - electronic switch" connected to the control unit via the modulator.

The principle of multiplication of frequency is as follows. CU forms control instructions using switching elements of phase regulators so that at each time moment only one of the primary windings is connected to the supply mains. Therefore, the angle of switching by each half-wave should be  $\alpha \geq 120^\circ$ . The root mean square value of voltage in the secondary circuit is determined by the following expression:

$$U_2 = 3U_m k_{tr} \sqrt{0,5 - \tau_j + (\sin 4 \pi \tau_j)/4\pi}$$

where  $U_m$  is the voltage of one of the phases,  $k_{tr}$  is the transformation coefficient of WR,  $t_j$  is the parameter determined by relationship  $t_j = t_j/T$  and  $t_j$  is the duty cycle, i.e. period of voltage in the mains.

As a result of such successive switching voltage  $U_2$  with a shape close to a triangle and frequency three times as high as that in the supply mains is induced in the phases in the secondary circuit. Hence, the cross section area of the magnetic core of WT can be reduced three times. Consumption of copper is reduced as well, which leads to a decrease of 1.8–2.0 times in weight of the transformer.

The use of the voltage resonance in the secondary circuit provides a sufficiently stable burning of the welding arc at an open-circuit voltage of 25–38 V. In this case the welding current varies from 40 to 200 A. The maximum current consumed at each of the phases is 9 A, while in short circuiting of the arc gap it decreases to 6.5 A. The power factor at the maximum current is  $\geq 0.95$ . Weight of the prototype of the device tested is not in excess of 13 kg.

**CONTROL OF COMPOSITION AND STRUCTURE OF DIE STEEL DURING ELECTROSLAG CLADDING USING NON-COMPACTED MATERIALS.** O.G.Kuzmenko (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Steel 5KhNM widely applied by the industry of Ukraine for making hot deformation dies has an insufficient heat resistance and low level of strength and wear resistance at increased temperatures. This eventually reduces life of tools. The problem is aggravated also by the fact that in some dies which have deep impression some of its elements are subjected to different types of wear: in the upper part of the impression the dominant types of wear are crushing and abrasion, while at the points of transition from side to bottom

виюры преобладающими видами изнашивания являются смятие и истирание, а в местах перехода от боковых поверхностей к донным — трещины механической усталости. Совместить в одном материале стойкость против таких видов повреждений весьма затруднительно.

Одним из путей решения данной проблемы, на наш взгляд, является применение при изготовлении и восстановлении штампового инструмента электрошлаковой наплавки (ЭШН) некомпактными материалами (стружка или другие отходы при обработке или выбраковке инструмента), при которой возможно управление как составом наплавляемого металла, так и его структурой для получения заданного комплекса служебных свойств с учетом назначения инструмента.

Для улучшения свойств наплавляемой стали марки 5ХНМ при ЭШН штампов стружкой было решено дополнительно легировать ее сильными карбидообразующими элементами (ниобием и титаном). Для легирования наплавленного металла этими элементами использовали электрохимический способ, основанный на восстановлении их из оксидов, входящих в состав флюса и подаваемых в шлак. В этом случае отпадает необходимость в использовании дорогостоящих металлов и ферросплавов, а также специальных дозаторов.

Анализ полученных данных показал, что при ЭШН стружкой стали марки 5ХНМ с использованием флюса системы  $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$  легирование наплавленного металла наиболее велико и сравнимо с лучшими показателями этого процесса при ЭШП. В процессе ЭШН стружкой можно получить различные структуры наплавленного металла по высоте рабочего слоя штампов. Так, для верхних участков гравюры была получена (без дополнительного легирования) литая направленная структура, которая отличается повышенной износостойкостью и лучшим сопротивлением смятию, чем кованный металл, а для нижних — армированная (оплавленными частицами стружки), имеющая высокую ударную вязкость и усталостную прочность. Ударная вязкость наплавленного металла при 600 °C составляет 95 Дж/см<sup>2</sup>, а кованого — 60 Дж/см<sup>2</sup>.

Эксплуатация штампов, восстановленных путем ЭШН стружкой стали марки 5ХНМ, показала, что их стойкость в 2 раза выше кованых из той же стали, а экономное легирование металла наплавки титаном и ниобием (0,1...0,2 %) повышает стойкость еще на 30 %.

**РЕШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ.** Ю. Г. Куцан, М. Л. Жадкевич (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Разработку технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) изделий новой техники можно упростить благодаря использованию метода компьютерного моделирования технологического процесса. Применительно к ЭЛС компьютерное моделирование предполагает оперативный поиск оптимального тепловложения в зоне термического воздействия пучка. Для технологических способов ЭЛС, использующих локальные развертки и сканирование пучка, принцип компьютерного моделиро-

surfaces wear occurs by the mechanism of mechanical fatigue cracks. Therefore, it is very difficult to combine resistance to such types of damage in one material.

One of the ways for solving this problem, in our opinion, is the use of electrosag cladding with non-compacted materials (chip or other wastes resulting from processing or rejection of tools) for the manufacture and repair of die tools. This method allows composition of the deposited metal and its structure to be controlled to produce the desirable set of service properties based on application of the tools.

To improve properties of steel 5KhNM by ESC using chip, it was decided to additionally alloy it with strong carbide formers (niobium and titanium). Alloying the deposited metal with these elements was done by the electrochemical method based on their reduction from oxides contained in the flux and fed to the slag. In this case there is no need for using expensive metals and ferroalloys, or special feeders.

Analysis of the results obtained showed that ESC of steel 5KhNM using chip and flux of the  $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$  system provides the highest level of alloying of the deposited metal, which is comparable with the best indicators of this process in ESR.

The ESC process using chip can provide various structures of the deposited metal through thickness of the working layer of dies. Thus, the cast oriented structure was produced in the upper regions of the impression. This structure is characterized by an increased wear resistance and better resistance to crushing than structure of the wrought metal. The reinforced (with fused chip particles) structure having high impact toughness and fatigue strength was produced in the lower regions of the impression. Impact toughness of the deposited metal at 600 °C is 95 J/cm<sup>2</sup>, while that of the wrought metal is 60 J/cm<sup>2</sup>.

Operation of 5KhNM steel dies repaired by ESC using chip showed that their strength is 2 times as high as that of the wrought dies of the same steel grade, and scarce alloying of the deposited metal with titanium and niobium (0.1–0.2 %) increases strength by another 30 %.

**SOLUTION OF TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF ELECTRON BEAM WELDING USING COMPUTER MODELLING AND MICROPROCESSOR-BASED CONTROL.** Yu.G.Kutsan, M.L.Zhadkevich (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Development of technology for electron beam welding (EBW) of advanced engineering items can be simplified through using computer modelling of technological processes. As applied specifically to EBW, computer modelling includes operational search for optimal heat input within the beam heat affected zone. For specific EBW processes which use local beam development and scanning, the principle of computer modelling is based on computation of power density within the heat spot. The active zone within which a stable energy exchange at the front

вания заключается в расчете распределения плотности мощности в пятне нагрева. Задавая траектории развертки пучка и скорость его перемещения, можно легко рассчитать активную зону, в пределах которой обеспечивается стабильный энергетический обмен на передней стенке канала проплавления по всей его глубине. Наличие стабильного энергообмена гарантирует формирование оптимальной геометрии зоны проплавления, что является эффективным средством получения качественных сварных соединений.

Для решения типовых технологических задач в ИЭС им. Е. О. Патона разработана библиотека программ, в базах данных которых сосредоточены сведения об основных технологических параметрах процесса: токе пучка, ускоряющем напряжении, токе фокусировки, геометрии развертки и частоте сканирования. Используемые программы, помимо расчетов, предполагают формирование как одно- так и двумерных локальных разверток с переменным количеством дискретных значений параметров в частотном диапазоне до 1 кГц.

Разработанный принцип компьютерного моделирования позволяет использовать программы, формирующие оптимальное распределение плотности мощности непосредственно в микропроцессорных системах управления электронно-лучевыми установками. Реализация таких систем осуществляется на базе микросредств управляющей вычислительной техники, при этом используются как отдельные микропроцессорные наборы, так и ПК. Эксплуатационная гибкость в этом случае достигается способом программного задания исходных данных, что обеспечивает адаптацию режимов работы системы к различным вариантам технологического процесса. Сочетание компьютерного моделирования с микропроцессорным управлением позволяет оперативно решать различные технологические задачи ЭЛС при получении высокого качества сварных швов изделий новой техники.

#### СТРУКТУРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ РАЗНОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ.

*С. И. Кучук-Яценко, Л. И. Маркашова, П. Н. Чвертко, Е. Н. Бердникова, И. Н. Мосендз, А. В. Бондарук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).*

Проблема улучшения механических и служебных характеристик сварных соединений приобретает особую актуальность при решении прикладных задач по созданию высококачественных конструкций из разнородных материалов, поскольку именно для таких типов соединений характерны нестабильность и наличие резких градиентов свойств.

На примере соединений рельсовой стали марки М76 со сталью марки 110Г13Л при использовании комплексной методики исследований на различных структурных уровнях (зернистом, субзернистом, дислокационном) рассматриваются закономерности формирования структурно-фазового состояния зоны соединения для условий контактной стыковой сварки и изменения этой структуры в зависимости от технологических параметров.

Рассматривается взаимосвязь структуры со свойствами сварных соединений. В результате аналити-

wall of the penetration channel through its entire thickness can be easily computed by assigning the beam scanning path and velocity. The presence of the stable energy exchange guarantees formation of the optimal geometry of the penetration zone, which is an efficient means for producing sound welded joints.

To solve typical technological problems, the E.O. Paton Electric Welding Institute developed a library of programs with the data bases containing information on the basic technological parameters of the process: beam current, accelerating voltage, focusing current, beam development geometry and scanning frequency. In addition to computations, the programs used provide for formation of both one- and two-dimensional local developments with variable quantity of discrete values of parameters in a frequency range of up to 1 kHz.

The developed principle of computer modelling makes it possible to use programs which form optimal distribution of power density directly in the microprocessor systems intended for control of electron beam installations. Operation of such systems is based on the control computer microprocessors, using either individual microprocessor sets or personal computers. Operational flexibility in this case is achieved by program setting of source data, which provides adaptation of working parameters of the system to different versions of a technological process. Combination of computer modelling with microprocessor-based control allows different technological problems of EBW to be solved promptly to ensure the high quality of welds in advanced engineering items.

#### STRUCTURAL POSSIBILITIES FOR IMPROVING PROPERTIES OF DISSIMILAR WELDED JOINTS UNDER CONDITIONS OF FLASH BUTT WELDING.

*S.I.Kuchuk-Yatsenko, L.I.Markashova, P.N.Chvertko, E.N.Berdnikova, I.N.Mosendz, A.V.Bondaruk (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).*

The issue of improving mechanical and service properties of welded joints is especially important for solving applied problem associated with fabrication of high-quality structures of dissimilar materials, as it is these types of joints that are characterized by instability and drastic gradients of properties.

Principles of formation of structure and phase composition of a joining zone for conditions of flash butt welding, and variations in this structure depending upon process parameters are studied by an example of welded joints between rail steel M76 and steel 110G13L, using an integrated procedure of investigations at different structural levels (grain, subgrain and dislocation). Relationship between structure and properties of welded joints is considered. Analysis of contribution of each of the specific structural factors (size of grain, subgrain, type of acicular structure, dislocation density, morphology and distribution of growing phases, etc.) to varia-

ческой оценки вклада каждого из конкретных структурных факторов (размера зерна, субзерна, типа игольчатых структур, плотности дислокаций, морфологии и распределения растущих фаз и т. д.) в изменение механических характеристик соединений зафиксировано следующее. Сравнительная равномерность прочностных характеристик и выравнивание свойств по мере перехода от стали марки М76 к аустенитной стали при контактной стыковой сварке пульсирующим оплавлением обусловлены упрочнением аустенитной стали (примерно до 670...750 МПа) преимущественно за счет формирования дисперсных фаз во внутренних объемах зерен ( $\Delta\sigma_T \approx 240$  МПа), общего повышения плотности дислокаций ( $\Delta\sigma_T \approx 140$  МПа), измельчения зеренной структуры ( $\Delta\sigma_T \approx 160$  МПа).

При контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением ухудшение свойств и наличие резкого градиента механических свойств ( $\Delta\sigma_T \approx 350...360$  МПа) вдоль поверхности контакта в значительной степени обусловлены специфическими изменениями в структуре аустенитной стали (укрупнением структурных элементов, общим уменьшением плотности дислокаций при образовании градиентов дислокационной плотности), а также в результате формирования массивных протяженных фазовых и сегрегационных образований зернограницного типа при практически полном отсутствии упрочняющих структурных факторов.

#### ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ДУГОВОЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ. В. А. Лебедев, В. Г. Пичак (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Особую актуальность в процессе сварки металлоконструкций приобретают задачи снижения энергетических и материальных затрат при обеспечении высокого качества сварного соединения. К числу этих задач следует отнести и необходимость значительного повышения производительности дуговых механизированных процессов. Существующее оборудование практически исчерпало свои возможности и требует поиска новых подходов для совершенствования технических средств и значительного улучшения их технологической эффективности. Все это в полной мере относится как к сварке в защитных газах конструкций из стали и алюминиевых сплавов, так и к сварке под флюсом и с использованием самозащитных порошковых электродных проволок.

В ИЭС им. Е. О. Патона предложено, разработано и реализовано несколько новых типов механизированного сварочного оборудования:

- полуавтоматы для сварки сталей и сплавов алюминия с применением полностью управляемых механизмов импульсной подачи электродной проволоки на основе квазиволновых преобразователей (КВП) движения, позволяющих четко дозировать количество металла в капле, которая принудительно переносится в металлическую ванну во всех пространственных положениях;
- полуавтоматы для сварки сталей и сплавов алюминия с применением полностью управляемых механизмов импульсной подачи электродной проволоки на основе КВП в сочетании с импульсами источника питания дуги по определенным алгоритмам;

itions in mechanical properties of the joints gave the following result. Comparative uniformity of strength characteristics and levelling of properties in transition from steel M76 to austenitic steel in the case of pulsed flash butt welding are caused by hardening of austenitic steel (approximately to 670-750 MPa) due to formation of dispersed phases in the bulk of the grains ( $\Delta\sigma_T \approx 240$  MPa), total increase in the dislocation density ( $\Delta\sigma_T \approx 140$  MPa) and refining of grain structure ( $\Delta\sigma_T \approx 160$  MPa).

In continuous flash butt welding, deterioration of mechanical properties and their drastic gradient ( $\Delta\sigma_T \approx 350-360$  MPa) along the surface of contact are caused primarily by specific changes in structure of austenitic steel (coarsening of structural components, total decrease in dislocation density in formation of dislocation density gradients), as well as by formation of massive extended phase and segregation elements of the grain-boundary type at an almost complete absence of structural hardening factors.

#### HIGH-EFFICIENCY MECHANIZED ARC WELDING EQUIPMENT FOR JOINING METAL STRUCTURES. V.A. Lebedev, V.G. Pichak (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

The problems of decreasing power and material consumption and assuring high quality of welded joints are of special importance for welding metal structures. These problems also include the need to provide a fundamental rise in productivity of the mechanized arc welding processes. Existing equipment has practically exhausted its capabilities. This makes it necessary to find new approaches to improvement of available facilities and raising their operational efficiency. All this fully applies both to gas-shielded welding of steel and aluminium alloy structures and to submerged-arc welding using self-shielding flux-cored electrode wires.

The E.O. Paton Electric Welding Institute suggested, developed and manufactured several new types of mechanized welding equipment:

- semi-automatic devices for welding steels and aluminium alloys using fully controlled mechanisms of pulsed feed of electrode wire based on quasi-wave displacement transducers (QWT), which provide an exact amount of metal in a drop urged to transfer to the metal pool in all spatial positions;
- semi-automatic devices for welding steels and aluminium alloys using fully controlled mechanisms of pulsed feed of electrode wire, based on QWT combined with pulses of the arc power source following certain algorithms;
- equipment of the "Triplet" type with simultaneous or sequential (following certain algorithms, including modulation and pulsed movement laws) feeding of three electrode wires.

This equipment has a single element base and comprises units and blocks of the block-modular design of

• оборудование типа «Триплет» с одновременной или поочередной (по определенным алгоритмам, в том числе модулирование и импульсные законы движения) подачей трех электродных проволок.

Это оборудование имеет единую элементную базу с использованием узлов и блоков блочно-модульной конструкции полуавтоматов и введением оригинальных разработок, позволяющих получить следующие результаты:

- снизить потери электродного металла на угар и разбрызгивание (до уровня не более 1...3 %) при использовании управляемых импульсных подач и применении импульсных источников питания дуги;
- улучшить структуру и механические свойства металла шва и околошовной зоны, перераспределить доли расплавленного и наплавленного металлов (при помощи управляемых импульсных систем и системы «Триплет»);

- существенно расширить диапазоны толщин свариваемого металла, осуществить управление формой шва (путем использования управляемых импульсных систем и системы «Триплет»);

- увеличить производительность дугового механизированного процесса (проблемы энергосбережения) путем использования в том или ином варианте системы «Триплет».

Все оборудование прошло производственное апробирование, в том числе при сварке различных узлов шинопроводов в углеграфитном производстве.

#### СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ. Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. В. Арсеньюк (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Изложен принципиальный подход к решению задачи повышения работоспособности и надежности разнородных соединений, построенный на экспериментальном установлении и анализе взаимосвязи внешних и внутренних факторов, укладывающихся в причинно-следственную цепочку технологические параметры-процессы, сопутствующие сварке, и структурообразование-свойства соединений. Такой подход, опирающийся на комплексные исследования физико-химических процессов и свойств, позволяет определить наиболее значимые структурные факторы, способствующие «нивелированию» резких градиентов механических свойств по зоне сварки, которые наиболее характерны для разнородных металлов, отличающихся ограниченной взаимной растворимостью.

С использованием результатов комплексных исследований, в том числе оптической, аналитической растровой и просвечивающей электронной микроскопии, на примере соединений Ti, Al, Si, сталей различного класса и др., выполненных способом сварки давлением в широком диапазоне скоростей нагружения ( $\epsilon \approx 1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ), рассматривается следующий ряд закономерностей.

**Пластическая деформация.** Во всем диапазоне скоростей внешнего нагружения пластическая деформация по зоне сварки имеет гетерогенный характер. Глубина и интенсивность локализованной деформации, а также микромеханизмы ее реализации существенно изменяются по мере нарастания скоростей деформации.

semi-automatic devices, based on original developments, yielding the following results:

- decrease in electrode metal losses for fume and spattering (to a level not more than 1-3 %), using controlled pulsed feeding and pulsed arc power sources;

- improvement in structure and mechanical properties of the weld and HAZ metal and redistribution of fractions of the molten and deposited metal (using controlled pulse systems and the "Triplet" system);

- substantial widening of the range of thickness of metal welded, control of the weld shape (using controlled pulse systems and the "Triplet" system);

- rise in productivity of the mechanized arc processes (power saving) using any version of the "Triplet" system. All these pieces of equipment have passed industrial validation, including for welding different units of bus-bars in carbon-graphite production.

#### PRESSURE WELDING. STRUCTURE AND PROPERTIES OF JOINTS IN DISSIMILAR METALS. L.I. Markashova, G.M. Grigorenko, V.V. Arsenyuk (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

The main principle used to solve problems associated with increasing performance and reliability of dissimilar welded joints is described. It is based on experimental determination and analysis of relationship between internal and external factors making up a cause-and-effect chain: technological parameters — processes accompanying welding and structurization — properties of welded joints. This principle based on a comprehensive investigation of physical-chemical processes and properties allows identification of the most significant structural factors contributing to "levelling" of drastic gradients of mechanical properties within the welding zone, which are most typical for dissimilar metals characterized by a limited mutual solubility.

Results of comprehensive investigations, including optical, analytical scanning and transmission electron microscopy, were used to consider the following series of regularities by an example of joints in Ti, Al, Cu and steels of different grades, etc. made by pressure welding within a wide range of loading rates ( $\epsilon \approx 1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ ).

**Plastic strain.** Plastic strain in the welding zone has a heterogeneous character over the entire range of rates of applied loading. Depth and intensity of localized deformation, as well as micromechanisms of its realization substantially change with increase in the strain rates.

**Mass transfer and phase formation.** In transition to welding processes with pulsed loading, along with the dislocation mechanisms the processes of mass transfer involve also forces causing displacement of masses associated with collective movement of the crystalline lattice defects within the field of effective welding stresses,

**Массоперенос и фазообразование.** Наряду с дислокационными механизмами к процессам массопереноса при переходе к процессам сварки с импульсными нагрузками подключается силовой характер перемещения масс, связанный с коллективными движениями дефектов кристаллической решетки в поле действующих сварочных напряжений, что способствует «транспортировке» на значительные расстояния не только атомов химических элементов и их комплексов, но и отдельных частиц свариваемых материалов. Для процессов фазообразования характерно изменение стехиометрического состава растущих новых фаз (по мере изменения концентраций), что сопровождается потерей устойчивости решетки и, соответственно, аморфизацией структуры в микрообъемах фаз, изменяющихся по составу. Рассматриваются термдеформационные условия сварки, способствующие замене зернограницного характера фазообразования равномерно-объемным распределением растущих интерметаллидных фаз, что способствует образованию в менее прочном металле структуры типа «квазикомпозит», эффект упрочнения в котором приводит к выравниванию градиента механических свойств вдоль зоны сварки.

Анализируется взаимосвязь структура-свойства с развиваемых позиций, основанных на принципе энергетического баланса.

#### СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОНЫ КОНТАКТА ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ ПОРИСТО-МОНОЛИТИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТИ-N. Л. И. Маркашова, Л. С. Киреев (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Рассмотрены структурные изменения при диффузионной сварке компактного (VT1-0) и пористого титана, полученного спеканием порошка титана различной зернистости, при различных режимах термдеформационного (сварочного) воздействия.

Показаны эволюция пористости и ее параметров (объема и распределения, коэффициента формы пористого пространства), внутренней структуры частиц порошкового материала (фазового состояния, плотности и распределения дислокаций и т. п.), а также изменение состояния зоны контакта между частицами порошкового титана.

Изложены особенности преобразования поверхности взаимодействия компактного титана с пористым титаном при формировании сварного соединения и описаны условия, способствующие образованию резких градиентов структурного состояния в локальной зоне сварки глубиной в несколько десятков микрон. Анализируется взаимосвязь формирования направленных структурных градиентов с протеканием определенных релаксационных процессов (полигонизации, рекристаллизации), а также реализуемых в ходе сварки микромеханизмов пластической деформации в соответствующей зоне.

Показана взаимосвязь структурных и механических характеристик в различных областях зоны сварки. Рассмотрены особенности структурных, фазовых изменений поверхностного охрупченного слоя и переходной зоны после термообработки в азоте пористого титана.

Показано, что слой нитрида титана, образующийся на поверхности зерен пористого порошкового тита-

which contributes to "transportation" to substantial distances of not only atoms of chemical elements and their complexes, but also individual particles of materials welded. The processes of phase formation are characterized by variations in stoichiometric composition of the new growing phases (with variations in concentrations), which is accompanied by loss in stability of the lattice and, hence, amorphization of structure in microvolumes of the phases with a varying composition.

Considered are thermal-deformation conditions of welding, promoting variations in the effect of grain-boundary character of the phase formation on volume-uniform distribution of the growing intermetallic phases, which causes structure of the "quasi-composite" type to form in a less strong metal, the hardening effect in which leads to levelling of the gradient of mechanical properties within the welding zone.

Relationship between structure and properties is analysed in terms of the suggested statements based on the energy balance principle.

#### STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS OCCURRING IN THE CONTACT ZONE DURING DIFFUSION BONDING OF POROUS-MONOLITHIC PRODUCTS ON TI-N BASE. L.I. Markashova, L.S. Kireev (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Structural transformations occurring during diffusion bonding of compact (VT1-0) and porous titanium produced by sintering of titanium powder with different particle sizes under different thermal-deformation (joining) effects are considered.

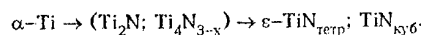
Evolution of porosity and its parameters (volume and distribution, shape factor of porous space), internal structure of particles of the powder material (phase composition, density and distribution of dislocations, etc.), as well as changes in the zone of contact between the titanium powder particles are described.

Peculiarities of transformations of the surface of interaction of compact and porous titanium, taking place during formation of a bond, and conditions promoting formation of drastic gradients of the structural state in the local zone of bonding to a depth of several tens of microns are outlined. Relationship between formation of directed structural gradients and occurrence of certain relaxation processes (polygonization, recrystallization), as well as plastic strain micromechanisms taking place during the bonding processes is analysed.

Relationship between structural and mechanical properties in different regions of the bonding zone is shown. Peculiarities of structural and phase changes in the embrittled surface layer and the transition zone of porous titanium after heat treatment in the nitrogen atmosphere are considered.

It is shown that the titanium nitride layer formed on the surface of grains of porous titanium powder is about 5-6  $\mu\text{m}$  deep and characterized by structural and phase heterogeneity. Phase transitions and changes in stoichiometric composition having the following sequence

на, имеет протяженность (по глубине) примерно 5...6 мкм и отличается неоднородностью по структуре и фазовому составу. По мере удаления от центра зерна, где находится чистый титан, к внешней поверхности азотированного слоя зафиксированы фазовые переходы с изменением стехиометрического состава в следующей последовательности:



Фазовым превращениям предшествуют, во-первых, изменения концентрации азота в локальных микрообъемах; во-вторых, переход структуры в состояние неустойчивости, сопровождающийся ее аморфизацией. Обнаруженные закономерности подобны процессам самоорганизации, протекающим по законам неравновесной термодинамики.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА ПРИ ЗАДАННЫХ ФРОНТАХ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ. В. В. Мелюков, К. В. Иванов-Польский (Вят. гос. техн. ун-т, г. Киров, РФ).

В результате экспериментальных исследований и математического моделирования процесса формирования сварного шва Н. Н. Прохоровым был разработан метод оценки и определены критерии повышения технологической прочности сварных швов в процессе кристаллизации. Это позволяет описывать и задавать форму фронта кристаллизации в сварочной ванне в виде уравнения, а также находить зависимость параметров этого уравнения от свойств свариваемого материала и режима сварки на основе решения прямой задачи теплопроводности.

Исследованы закономерности формирования макроструктуры металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением, разработаны новые методы, позволяющие воздействовать на процесс структурообразования.

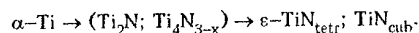
С развитием методов оптимизации теплового режима сварки становится возможной постановка задачи управления процессом формирования первичной макроструктуры сварного шва и определение режима сварки в зависимости от заданных размеров и формы фронта кристаллизации.

В случае квазистационарного теплового процесса сварки плавлением прямолинейного стыка пластин объемным источником, перемещающимся вдоль стыка с постоянной скоростью, фронты плавления и кристаллизации, а также заданное для них распределение температур являются непрерывными и кусочно-непрерывными функциями, заданными параметрически.

При заданных форме фронтов плавления, кристаллизации и распределении температур задачей оптимального управления тепловым процессом сварки является нахождение такого ограниченного по мощности источника энергии, при котором истинное распределение температуры во фронтах достигало бы минимального квадратичного отклонения от заданного.

Для нахождения указанного оптимального источника было произведено численное моделирование теплового квазистационарного процесса в подвижной системе координат, модель которого представляет собой неоднородное линейное дифференциальное уравнение в частных производных. Решение

are fixed with distance from the centre of the grain where pure titanium is situated to the external surface of the nitrided layer:



Phase transformations are preceded, firstly, by variations in the nitrogen concentrations in local microvolumes and, secondly, by transition of the structure to the instability state, accompanied by its amorphization. The observed phenomena are similar to the self-arrangement processes which occur following the laws of non-equilibrium thermodynamics.

#### DETERMINATION OF OPTIMAL HEAT SOURCE AT PRESET FRONTS OF MELTING AND SOLIDIFICATION. V.V.Melyukov, K.V.Ivanov-Polsky (Vyatsky State Technical University, Kirov, Russia).

As a result of experimental studies and mathematical modelling of the process of weld formation, N.N.Prokhorov developed a method for estimation and defined criteria for increase in technological strength of the welds during solidification. This allows the shape of the solidification front in the weld pool to be assigned and described in a form of equation, as well as dependence of parameters of this equation upon properties of a material welded and welding conditions to be established on the basis of solving a direct problem of thermal conductivity.

Principles of formation of a macrostructure of the weld metal in electron beam welding with deep penetration were studied, and new methods allowing the process of structuring to be affected were developed.

Development of the methods for optimization of thermal conditions of welding makes it possible to formulate the problem of control of the process of formation of the primary macrostructure of the weld and determination of welding conditions depending upon the preset parameters and shape of the solidification front.

In the case of a quasi-stationary thermal process of straight-line butt fusion welding of plates, using a volumetric heat source moving along the butt joint at a constant speed, the melting and solidification fronts and the preset temperature distribution for them are continuous and fragment-continuous functions established parametrically.

At the preset shape of the melting and solidification fronts and temperature distribution the problem of optimal control of the thermal process of welding consists in finding such a limited-capacity energy source which could provide a true temperature distribution at the fronts equal to a minimum standard deviation from the preset value.

To find such an optimal heat source, we conducted numerical modelling of the thermal quasi-stationary process on a movable coordinate system. The model of the process was an inhomogeneous linear differential equation with particular derivatives. The inverse problem of thermal conductivity was solved on the basis of modelling by the method of non-linear regression using the "Mathematica v.3.0" software package. The found optimal source is a group of spot-type moving sources. The regression parameters to be determined in this case

обратной задачи теплопроводности получено на основе моделирования методом нелинейной регрессии в среде пакета «Mathematica v.3.0». Найденный оптимальный источник представляет собой группу точечных движущихся источников. При этом искомыми параметрами регрессии являются координаты и значения мощности указанных точечных источников, которые используются для управления электронно-лучевой сварочной установкой.

#### МЕХАНИЗИРОВАННАЯ СВАРКА В РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ. В. М. Мозок, А. Е. Коротынский (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Механизированные способы сварки отличаются значительным преимуществом (в сравнении с ручной сваркой штучными электродами) по производительности процесса и возможностям автоматизации выпуска сварных конструкций. К сожалению, эти преимущества реализуются только при сварке в нижнем положении.

При обычных источниках питания дуги сварка в различных пространственных положениях осуществляется либо сплошной проволокой диаметром до 1,0...1,2 мм в защитных газах (порошковой диаметром до 1,4...1,6 мм), либо дополнительными электронными модуляторами тока, либо дополнительными технологическими приемами.

В промышленности развитых стран отлично зарекомендовали себя электронные модуляторы фирм «Lincoln Electric» и «Kemppu», однако их принципиальный недостаток заключается в увеличении в 2-3 раза установленной мощности источников питания дуги, больших стоимости и объеме силовой электроники. Направленный перенос капель при электронном управлении импульсами тока обеспечивается за счет взаимодействия электромагнитных полей и электродинамических сил (пинч-эффект и движение жидкого проводника в электромагнитном поле), а для преодоления сил гравитации при потолочном или полупотолочном положениях значение импульса должно в несколько раз превышать номинальный сварочный ток дуги.

В то же время при ручной сварке штучными электродами высококвалифицированные сварщики для потолочного и полупотолочного положения часто применяют «стряхивание» капли с торца электрода вверх, которая затем удерживается в ванне силами поверхностного натяжения открытой поверхности ванны и адгезией металла ванны к основному металлу и закристаллизованному металлу шва.

Различным вариантам импульсно-дуговых технологий в последние годы уделяется очень много внимания. Используются различные подходы и варианты решений управления циклом дуги для оптимизации перехода капли электродного металла в сварочную ванну. Одним из таких решений является создание механического модулятора сварочного тока (ММС), использующего для переноса импульсы капли, срывающейся с торца электрода при его торможении (35...80 импульсов на один оборот подающего ролика). Указанный ММС совместим почти со всеми существующими источниками питания дуги с жесткой или пологопадающей внешней характеристикой независимо от рода тока.

ММС обеспечивает получение качественного шва на постоянном или переменном токе материалами

are coordinates and values of capacity of the said sources used to control electron beam welding installation.

#### MECHANIZED WELDING IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS. V.M.Mozok, A.E.Korotynsky (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

Mechanized welding methods are characterized by considerable advantages (in comparison with manual stick-electrode welding) in process productivity and possibilities of automation of fabrication of welded structures. Unfortunately, these advantages can be utilized only in welding in flat position.

With the use of conventional arc power supplies welding in different spatial positions is performed either using solid wire up to 1.0-1.2 mm in diameter in gas shielding atmospheres (flux-cored wire 1.4-1.6 mm in diameter) or using additional electronic current modulators or other extra techniques.

In industrialized countries the popular electronic current modulators are those produced by "Lincoln Electric" and "Kemppu". However, they have drawbacks consisting in an increase of 2-3 times in the installed power of the arc power supplies, high price and volume of the power electronics.

The directed drop transfer in electronic control of current pulses is provided by interaction of electromagnetic fields and electrodynamic forces (pinch-effect and movement of a liquid conductor in the electromagnetic field), while to overcome the gravity forces in overhead and semi-overhead positions the pulse values should exceed several times the nominal welding arc current. At the same time, in manual welding using stick electrodes in overhead and semi-overhead positions the highly skilled welders often use "shaking off" of a metal drop from the electrode tip, which is then retained in the pool by the surface tension forces acting on the exposed pool surface and by adhesion of the pool metal to the base metal and solidified weld metal.

Much consideration is given currently to different modifications of pulsed-arc technologies. Different approaches and different solutions to control of the arc cycle are employed to optimize transfer of the electrode metal drop to the weld pool. One of such solutions is development of a mechanical modulator of the welding current (MMWC), which uses to cause the transfer the inertia of the drop detaching from the tip of the electrode in its deceleration (35-80 pulses per turn of the feeding roller). This MMWC is compatible with almost all existing arc power supplies with constant or quietly drooping external characteristic, independently of the kind of the current. MMWC provides the sound weld at a direct or alternating current using consumables intended only for the direct current of reverse polarity and requires the lower installed power to ensure the stable process than traditional feed mechanisms (for the same size and type of electrode wire).

In this connection, in the case of using MMWC the power consumption needed to melt electrode wire is reduced almost twice and portable power supplies VDK-300M

только для постоянного тока при обратной полярности, требует для устойчивого процесса меньшей установленной мощности источника питания, чем традиционные подающие механизмы (для того же размера и типа электродной проволоки).

В связи с тем, что с ММСТ энергозатраты на плавление электродной проволоки снижаются примерно вдвое, становится возможным использование для порошковой проволоки диаметром до 3,0...3,2 мм переносных источников питания ВДК-300М (36 кг), Корал-400 (18 кг), РСИ-350-ЗП (45 кг) и др. взамен стационарных ВС-300Б (190 кг), ВДУ-506 (380 кг). Такие полуавтоматы в составе передвижных сварочно-технологических комплексов АСТК-8 (260 кг), АСТК-12 могут использоваться для сварки и резки порошковой проволокой диаметром до 3 мм любых металлоконструкций с толщиной металла до 40 мм в полевых условиях.

Таким образом, совместное использование подающих механизмов с ММСТ и переносных источников питания дуги позволило создать комплекты оборудования для ремонтных и аварийных работ в 12...15 раз легче существующих серийных. Промышленные образцы таких полуавтоматов успешно использовались с 1994 г. при ремонте дуговой сваркой, наплавкой крупногабаритного и уникального оборудования на сахарных заводах, на ЮГОКе и СевГОКе в г. Кривой Рог, на комбинате «Александрияуголь» и других промышленных объектах. Головной образец комплекса АСТК-6 блочно-модульного исполнения (240 кг) с февраля 1999 г. работает в энергомехуправлении зоны ЧАЭС (на шасси УАЗ с бригадой 4 чел.).

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ КОНТАКТНО-СТЫКОВОЙ СВАРКЕ. Н. В. Новик (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и зашит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь).

Проведены металлографические исследования, определен размер зоны термического влияния при выполнении контактно-стыковой сварки сопротивлением пружин холодной навивки диаметром от 6 до 8 мм из углеродистой и низколегированной углеродистой стали в термообработанном состоянии.

При изменении основных параметров сварки (усилия сжатия электродов, коэффициента трансформации подаваемого сварочного напряжения и длительности протекания сварочного тока) в зависимости от диаметра свариваемой проволоки определяли оптимальный режим процесса, при котором не образуются грат и расслоения металла, вызываемые искривлением волокон при осадке, и достигается требуемая прочность соединения.

В результате металлографических исследований установлен характер структурных изменений зоны термического влияния, условно разбитой на четыре участка в зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения.

Нагрев зоны соединения (участок 1) происходит до температуры, выше таковой фазовых превращений. Зафиксировано образование общих зерен на границе свариваемых поверхностей и рост зерна. Микроструктура в этой зоне среднеуглеродистых сталей — трооститная, низколегированных — нижнего бей-

(36 кг), Корал-400 (18 кг), РСИ-350-ЗП (45 кг), etc. intended for flux-cored wire with a diameter of 3.0–3.2 mm can be used instead of stationary power supplies VS-300B (190 kg) or VDU-506 (380 kg). Such semi-automatic devices in a set with the mobile welding-technological complexes ASTK-8 (260 kg) or ASTK-12 can be employed for up to 3 mm dia. flux-cored wire welding and cutting of any metal structures up to 40 mm thick under field conditions.

Therefore, the combined use of feed mechanisms with MMWC and portable arc power supplies made it possible to create packages of equipment for repair and emergency operations, which have a weight 12–15 times lower than standard equipment. Commercial samples of such semi-automatic devices have been successfully used since 1994 for repair by arc welding and surfacing of large-sizes and unique facilities at sugar-making plants, at YuGOK and SevGOK in Kryvyi Rig, at the "Aleksandriyugol" plant and other industrial objects. The basic prototype of the ASTK-6 complex of the block-modular modification (240 kg) has been in operation since 1999 at the energy-mechanical control workshop of the Chornobyl Nuclear Power Station (undercarriage of UAZ serviced by a team of 4 people).

#### INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE OF THE HAZ OF FLASH BUTT WELDED JOINTS IN CARBON STEELS. N.V. Novik (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus).

Metallography was conducted and size of the HAZ was determined in flash butt welding of cold-coil springs from 6 to 8 mm in diameter made from carbon and low-alloy carbon steel in the heat-treated state.

Optimal parameters of the process which form no flash and delamination of metal caused by distortion of fibres in upsetting, and which provide the required strength of a welded joint were determined by varying the basic welding parameters (force of compression of electrodes, coefficient of transformation of the supplied welding voltage and duration of flow the welding current), depending upon the diameter of welding wire.

The character of structural transformations in the HAZ conditionally subdivided into four regions depending upon the heating temperature and cooling rate was established by metallography.

The joining zone (region 1) was heated to a temperature above that of phase transformations. Formation of common grains at the interface between the mating surfaces and grain growth were fixed. Microstructure in this zone of medium-carbon steels consists of troostite, that of low-alloy steels consists of lower bainite and that of carbon steels with a carbon content of 0.6–0.8 % — lower bainite and martensite. The presence of martensite in the structure of cold-coil spring steels is permissible. Size of this zone is 2–3 of that of the grain.

Region 2 in carbon and low-alloy steels is characterized

нита, углеродистых сталей с содержанием углерода 0,6...0,8 % — нижнего бейнита и мартенсита. Наличие в структуре пружинных сталей холодной навивки мартенсита вполне допустимо. Размер этой зоны составляет 2...3 размера зерна.

На участке 2 у углеродистых и низколегированных сталей зафиксирована укрупненная ферритно-перлитная, а у легированных — мартенситно-бейнитная структура.

Участок 3, где происходит нагрев в интервале температур  $A_3$ ... $A_1$ , характеризуется следующей микроструктурой: для среднеуглеродистых сталей — ферритно-перлитной, но с меньшим размером зерна, чем на участке 2; для низколегированных — бейнитной; с содержанием углерода 0,6...0,8 % — мартенситной. У низколегированных сталей в этой зоне возможно появление карбидных выделений по границам зерен, поэтому для уменьшения напряжений, вызванных структурными изменениями, для легированных сталей и сталей с содержанием углерода 0,6...0,8 % необходимо проведение предварительного подогрева или последующего медленного охлаждения.

На участке 4, нагреваемом до температуры, близкой к  $A_1$ , происходит отпуск с образованием структуры зернистого бейнита, не ухудшающей механических свойств материала. Размер зоны термического влияния изменился от 3 до 5 мм.

При сравнительных испытаниях на разрыв прочность сварных соединений, полученных способом стыковой сварки сопротивлением, в 1,5...2,0 раза выше, чем у соединений, выполненных электродуговой сваркой. Применение способа контактно-стыковой сварки для пружин холодной навивки улучшает санитарно-гигиенические условия труда сварщика, повышает производительность труда в 2,0...2,5 раза, сокращает численность обслуживающего персонала, снижает трудоемкость в 5...6 раз.

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ГИДРОЦИЛИНДРОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В ТЕРМОУПРОЧНЕННОМ СОСТОЯНИИ.** А. С. Павлов, В. И. Захаров (НГТУ, АО «Гидромаш», г. Нижний Новгород, РФ). В конструкциях силовых узлов гидросистем шасси самолета широко применяются высокопрочные стали марки 30ХГСН2А, успешно соединяемые способом электронно-лучевой сварки (ЭЛС) с последующей термообработкой сварных узлов в печах. Однако значительные трудности возникают в случае использования этого процесса для соединения деталей, свариваемых в термоупрочненном состоянии, поскольку в околошовной зоне сварного соединения образуются зоны разупрочнения и подкалки. Для подтверждения данной гипотезы были проведены исследования ЭЛС и локальной термической обработки узлов из стали 30ХГСН2А в термоупрочненном состоянии.

Разработан технологический процесс ЭЛС, который выполняют в едином технологическом цикле. Он включает три технологические операции: локальный предварительный подогрев, сварку и зональную термическую обработку (ЗТО) сканирующим лучом. Опытным путем определен оптимальный диапазон основных параметров режимов подогрева, сварки и термической обработки.

by a coarsened ferritic-pearlitic structure and that in alloyed steels - by the martensitic structure.

Region 3, where heating occurs within a temperature range of  $A_3$ ... $A_1$ , is characterized by the following microstructure: for medium-carbon steels — ferritic-pearlitic but with a smaller grain size than in region 2; for low-alloy steels — bainitic; and for steels with a carbon content of 0.6–0.8 % — martensitic. Formation of carbide precipitates along the grain boundaries might occur in this region for low-alloy steels. Therefore, to decrease stresses induced by structural transformations in alloyed steels and steels with a carbon content of 0.6–0.8 %, it is necessary to subject them to preheating or postweld delayed cooling.

Region 4 heated to a temperature close to  $A_1$  is characterized by tempering to form structure of granular bainite, which does not deteriorate mechanical properties of the material. In this case size of the HAZ varies from 3 to 5 mm.

Comparative tensile tests of flash butt welded joints show that their strength is 1.5–2.0 times as high as that of electric arc welded joints. Flash butt welding of cold-chill springs features improved sanitary-hygienic working conditions of welders, rise of 2.0–2.5 times in productivity, reduction of the number of attending personnel and decrease of 5–6 times in labour consumption.

**ELECTRON BEAM WELDING OF HYDRAULIC CYLINDERS OF HEAT-HARDENED HIGH-STRENGTH STEELS.** A. S. Pavlov, V. I. Zakharov (NGTU, AO "Gidromash", Nizhny Novgorod, Russia). High-strength steels of the 30KhGSN2A grade are widely used for making load-carrying structures of hydraulic systems of aircraft landing gear. These steels are successfully joined by electron beam welding (EBW) with postweld heat treatment of weldments in furnaces. However, substantial difficulties arise with this process used to join pieces which are in a heat-hardened condition, as it results in the formation of weakened and underquenched zones in the HAZ of the welded joint. To prove this hypothesis, investigations were conducted to study EBW and local heat treatment on units of steel 30KhGSN2A in the heat-hardened condition.

The EBW technology realized in a single technological cycle was developed. It includes three technological operations: local preheating, welding and zonal heat treatment (ZHT) using a scanning electron beam. The optimal range of basic parameters of preheating, welding and heat treatment was determined experimentally on the basis of experimental data.

Preheating of surfaces of the weld edges to 250–300 ° is performed with a scanning electron beam which has a low power constituting only 20–25 % of the welding power.

Предварительный подогрев поверхности кромок свариваемого стыка до 250...300 °C осуществляется сканирующим электронным лучом небольшой мощности, составляющей 20...25 % мощности сварки. Удельная мощность при сварке не должна превышать  $23 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, т. е. оптимальную для расплавления данного объема металла.

Экспериментально установлено, что наиболее благоприятной является осцилляция луча в форме эллипса с отношением осей 1:2 при расположении большой оси перпендикулярно стыку с заглублением луча на 2/3 толщины. При выбранной форме осцилляции происходят наиболее благоприятные распределения плотности мощности луча.

Оптимальная температура нагрева не должна превышать температуру высокого отпуска (650 °C). Эффективность нагрева в зонах подкалки до температуры высокого отпуска 650 °C зависит от соотношения  $v_n/v_{пр}$  (скорости поперечного перемещения к скорости продольного перемещения относительно оси шва). При скорости сварки 10...14 м/ч частота сканирования должна составлять 800...1000 Гц. Изменение  $v_n/v_{пр}$  в сторону уменьшения приводит не только к нагреву до высоких температур зон подкалки сварного шва, но и к его разупрочнению. При частоте сканирования более 1000 Гц температура нагрева превышает 650 °C, что способствует росту зерна.

Длительность выдержки при температуре 650 °C в процессе ЗТО оказывает влияние на размер зерна в зоне подкалки и на показатели пластичности. Экспериментально установлено, что продолжительность выдержки должна составлять 25...30 мин.

Таким образом, путем использования ЭЛС и ЗТО сканирующим лучом можно получить надежные, работоспособные соединения. Разработана и внедрена на предприятии АО «Гидромаш» технология ЭЛС с последующей ЗТО сварных соединений гидроцилиндров из стали марки 30ХГСН2А в термоупрочненном состоянии.

**ОПЫТ РЕПОНКИ СВАРКИ НА ЛОПАТКАХ ТУРБИН ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ.** Н. И. Пинчук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. А. Матвеев (СКБ «Союзгазтехремонт», г. Брянск, РФ). Восстановление поврежденных при эксплуатации газотурбинных лопаток является важным для снижения затрат на приобретение турбин зарубежного производства, в частности в газоперекачивающих агрегатах магистральных газопроводов. Лопатки располагаются в зоне наиболее высоких температур и относятся к одним из самых ответственных деталей турбины. Ремонт локальных дефектов на лопатках импортного производства рекомендуется выполнять в специализированных предприятиях за рубежом.

В ИЭС разработана технология заварки эксплуатационных дефектов лопаток турбин импортного производства отечественными сварочными материалами.

Направляющие лопатки:

- ТВД и ТНД газогенератор «Эвон»,  $T_p \approx 900$  °C и  $T_r \approx 650$  °C, сплав Hastelloy X;
- ТВД ГТК-10 И,  $T_p \approx 900$  °C, сплав FSX-414 (Cr-Cr-Ni-W);
- ТНД ГТК-10 И,  $T_p \approx 700$  °C, сплав N-155 (Fe-Cr-Co-Ni).

Specific power in welding should not exceed  $23 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>, i.e. it should be optimal for melting a given metal volume.

As experimentally established, the most favourable beam oscillation is that in the form of ellipse with a ratio of axes equal to 1:2, where the large axis is normal to the joint and the beam penetrates into the metal to 2/3 of its thickness. This form of oscillation provides the most favourable distribution of the beam power density. The optimal temperature of heating should not exceed the temperature of high-tempering (650 °C). The efficiency of heating within the underquenched zones to the temperature of high-tempering, i.e.  $T = 650$  °C, depends upon the ratio of  $v_t/v_l$  (speed of transverse displacement to speed of longitudinal displacement, relative to the weld axis). At a welding speed of 10–14 m/h the scanning frequency should be 800–1000 Hz. A change in  $v_t/v_l$  toward decrease leads not only to heating to high temperatures of the backing zones of the weld, but also to its weakening. At a scanning frequency of more than 1000 Hz the heating temperature exceeds 650 °C, which leads to grain growth.

The time of holding at a temperature of 650 °C during the ZHT process affects the grain size in the backing zone and values of ductility. As experimentally found, the time of holding should be 25–30 min.

Therefore, EBW and ZHT using a scanning electron beam provide reliable and serviceable joints. The EBW technology followed by ZHT of the welded joints was developed by Gidromash and applied for joining hydraulic cylinders of steel 30KhGSN2A in the heat-hardened condition.

**EXPERIENCE OF REPAIR WELDING OF TURBINE BLADES USED IN GAS-PUMPING PLANTS.** N.I. Pincuk (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine), V.A. Matveev (SKB "Soyuzgastekhprom", Bryansk, Russia). Repair of gas turbine blades damaged in operation is important for reducing costs for buying foreign turbines, in particular at gas-pumping plants of main pipelines. Blades are located in the zone of the highest temperatures and are regarded as the most critical turbine parts. It is commonly recommended that repair of local defects in foreign turbine blades be performed by specialized foreign companies.

The E.O. Paton Electric Welding Institute developed a technology for repair welding of service defects in foreign-made turbine blades and vanes using domestic welding consumables.

Vanes:

- TFE (turbofan engine) and TSC (turbo-supercharger) gas generator «Avon»,  $T_r \approx 900$  °C and  $T_r \approx 650$  °C, alloy Hastelloy X;
- TFE GTK-10I,  $T_r \approx 900$  °C, alloy FSX-414 (Co-Cr-Ni-W);
- TSC GTK-10I,  $T_r \approx 700$  °C, alloy N-155 (Fe-Cr-Co-Ni);

Рабочие лопатки:

- ТНД ГТК-10 И,  $T_p \approx 650^\circ\text{C}$ , никелевый сплав Udimet 500 ( $\Sigma \text{Al, Ti } 6\%$ );

- ТВД ГТК-10 И и ГТК-25 И,  $T_p \approx 830$  и  $\approx 850^\circ\text{C}$ , никелевый сплав Inconel 738 ( $\Sigma \text{Al, Ti } 6,8\%$ ).

Работы по отработке технологии ремонтной сварки и восстановлению лопаток осуществляли на ремонтной базе Мингазпрома в Брянске. Ремонт подвергали лопатки, находившиеся в эксплуатации 10...20 тыс. ч с локальными эксплуатационными дефектами. Последние представляли собой в основном участки разрушения газовой коррозией выходной кромки и верхушек лопаток. Размер дефектов колебался от точечных диаметром в несколько миллиметров до разрушений большой протяженности (50...120 мм). Значительная протяженность дефектов характерна для всех видов направляющих лопаток, а также рабочих лопаток из сплава Udimet 500.

Наплавку кромки и заварку отдельных дефектов глубиной до 3...5 мм лопаток из сплавов N-155, FSX-414 и Hastelloy X выполняли неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне с присадкой проволокой марки 08X25N20C2P1 (ЭП532), разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона. Благодаря использованию присадки обеспечивается повышенная стойкость швов против образования трещин и высокотемпературной газовой коррозии.

Ремонт рабочих лопаток из никелевых сплавов Udimet 500 и Inconel 738 выполняли микроплазменной наплавкой с присадкой гранулированного никелевого сплава марки ХН60МВЮ с содержанием алюминия до 4 %.

После заварки дефектов на лопатки ТВД из никелевых сплавов Hastelloy X и Inconel 738 наносили защитное покрытие способом высокотемпературного осаждения сплава  $\text{Co-(Ni)-Cr-Al-Y}$ .

Технология ремонтной сварки была успешно внедрена на ремонтной базе Мингазпрома в г. Брянске и на Энергоремонтном заводе в г. Камышин. Опытно-промышленная апробация восстановленных лопаток в условиях эксплуатации на компрессорных станциях (КС) действующих газопроводов показала их высокую работоспособность. Согласно данным на конец 1991 г., длительность эксплуатации направляющих лопаток из сплавов Hastelloy X (Тюменьтрансгаз), FSX-414 (Волгоградтрансгаз) и N-155 (Черкасытрансгаз) превышала соответственно 21000, 12300 и 8000 ч. Длительность эксплуатации рабочих лопаток из сплава Udimet 500 (Волгоградтрансгаз) превышала 9600 ч. Отремонтированные лопатки из каждого сплава исчислялись сотнями. Количество лопаток соплового аппарата из сплава FSX-414 превышало 1000 шт.

Рабочие лопатки из трудносвариваемого никелевого сплава Inconel 738 были выполнены в ограниченном объеме. 20 лопаток были установлены в ТВД на КС «Сохрановка» (Волгоградтрансгаз), длительность их эксплуатации равнялась 10080 ч. 35 лопаток находились в эксплуатации на КС «Давыдовская» (Мострансгаз). После эксплуатации в течение 12300 ч лопатки не имели повреждений и их эксплуатация была продолжена. Отмечена удовлетворительная прочность сцепления обоих видов наплавленного металла с покрытием.

Blades:

- TSC GKT-10I,  $T_p \approx 650^\circ\text{C}$ , nickel alloy Udimet 500 ( $\Sigma \text{Al, Ti } 6\%$ );

- TFE GKT-10I and GKT-25I,  $T_p \approx 830^\circ\text{C}$  and  $T_p \approx 850^\circ\text{C}$ , nickel alloy Inconel 738 ( $\Sigma \text{Al, Ti } 6,8\%$ ).

The work on optimization of the technology of repair welding and reconditioning of blades was performed at the repair workshop of Mingazprom in Bryansk. Repair was done on blades which had been in use for 10,000–20,000 hours and contained local service defects. The latter were mostly in regions damaged by gas corrosion, located at the outside edge and blade tips. Size of defects varied from spots with a diameter of several millimeters to extended fractures 50–120 mm long. Considerable length of defects is characteristic of all types of vanes and blades of Udimet 500.

Deposition on the edge and welding of individual defects to 3–5 mm deep in blades of alloys N-155, FSX-414 and Hastelloy X were done with tungsten electrode in argon using filler wire of the 08Kh25N20S2R1 grade (EP532) developed by the E.O. Paton Electric Welding Institute. The use of the filler provides an increased resistance of the welds to cracking and high-temperature gas corrosion.

Repair of the blades of nickel alloys Udimet 500 and Inconel 738 was performed by microplasma welding using a filler of granulated nickel alloy of the KhN60MVYu grade with an aluminium content of up to 4 %.

After repair welding of defects, the TFE blades of nickel alloys Hastelloy X and Inconel 738 were covered with protective coatings by high-temperature deposition of alloy  $\text{Co-(Ni)-Cr-Al-Y}$ .

The repair welding technology was successfully applied at the repair workshop of Mingazprom in Bryansk and at the Power Plant Repair Works in Kamyslin. Industrial tests of the repaired blades and vanes under service conditions at compressor stations of active gas pipelines showed their high performance. According to the available data by the end of 1991, service life of vanes of Hastelloy X (Tyumentransgaz), FSX-414 (Volgogradtransgaz) and N-155 (Cherkassytransgaz) was over 9600 h. The repaired vanes of each of the alloys amount to hundreds in number. Quantity of vanes of the nozzle apparatus of alloy FSX-414 is over 1000 pcs.

Blades of hard-to-weld nickel alloy Inconel 738 were made in limited amount. 20 blades were installed in TFE at the compressor station "Sokhranovka" (Volgogradtransgaz) and their life time amounted to 10080 h. 35 blades were in use at the compressor station "Davydovskaya" (Mostransgaz). After being in use for 12,300 h the blades had no damage and remained in operation. Satisfactory strength of adhesion of both types of the deposited metal to coatings was noted.

**СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ ДЛИННО-МЕРНЫХ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НИЗКОАМПЕРНОЙ СЖАТОЙ ДУГОЙ.** С. П. Рагунович, В. К. Шелег, В. А. Цыганов (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). Повышение концентрации энергии в пятне нагрева при сварке сжатой дугой позволяет увеличить скорость процесса, уменьшить тепловложение на единицу длины шва, а также его ширину. Это связано прежде всего с распределением толщины прослойки расплавленного металла в зоне горения дуги для источников плазменного потока разной концентрации. При возможности регулирования толщины прослойки расплавленного металла решается задача управления формой зоны проплавления и, следовательно, можно перейти к сварке при пониженной тепловой мощности источника нагрева за счет регулирования газодинамического воздействия на расплавленную ванну. Режимы сварки с повышенным силовым воздействием плазмы на расплавленный металл осуществляются с полным проникновением дуги сквозь объем сварочной ванны. Однако дальнейшее снижение тепловложений при увеличении концентрации энергии в пятне нагрева ограничено, что связано с нарушением гидродинамической обстановки в сварочной ванне из-за превышения на отдельных участках силового воздействия плазменного потока над гравитационными силами и силами поверхностного натяжения на границе жидкости, а также с появлением неустойчивости.

Проведено моделирование сварочной ванны при сварке длинномерных листовых конструкций низкоамперной проникающей сжатой дугой со сквозным проплавлением. В предположении безградиентности коэффициента поверхностного натяжения, постоянства плотности газового потока для установившегося процесса взаимодействия расплавленного металла ванны и газа получены уравнения баланса сил и тепловложений в сварочной ванне, на основе которых проведено исследование устойчивости сварочной ванны в терминах равновесия. Приведена оценка оптимальных параметров режима стабильного взаимодействия жидкости и газа в сварочной ванне с одной капиллярно-гравитационной волной на поверхности, а также определена длительность развития неустойчивости.

Установлено, что стабильность процессов в сварочной ванне обеспечивается при определенных отношениях инерционных сил газа, гравитационных и поверхностных сил. Инерционные силы газа должны превышать гравитационные в жидкости, но не быть больше капиллярных. Из условия равенства трех составляющих процесса определена оптимальная толщина металла, сравнимая с размером капли в сварочной ванне. Полученное соотношение для оптимальной толщины металла совпало с определением одной длины капиллярно-гравитационной волны на поверхности жидкости, при которой скорость ее распространения минимальна. Например, для стали оптимальная толщина металла, при которой процесс сварки стабилен, составила 0,02 м, причем характерная скорость газового потока в этом случае равнялась 120 м/с для аргона.

**STABILITY OF THE PROCESS OF LOW-AMPERAGE CONSTRICTED ARC WELDING OF LONG SHEET STRUCTURES.** S.P. Ragunovich, V.K. Sheleg, V.A. Tsyganov (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus). Increase in the energy concentration in a heat spot during constricted arc welding allows the process speed to be increased and heat input per unit length of the weld and its width to be decreased. This is primarily associated with a distribution of thickness of the molten metal interlayer within the arc burning zone for plasma flow sources of different concentration. The possibility of regulating thickness of the molten metal interlayer helps solve the problem of control of shape of the penetration zone. This, in turn, makes it possible to perform welding at a decreased thermal power of the heat source by regulating the gas-dynamic effect on the weld pool. Welding conditions with an increased force effect of plasma on the molten metal provide through penetration of the weld pool volume by the arc. However, further decrease in heat input with an increase in the energy concentration in the heat spot is limited, which is associated with violation of the gas-dynamic situation in the weld pool caused by the fact that in individual regions the force effect of the plasma flow exceeds gravity forces and surface tension forces at the liquid interface, as well as by formation of instability.

Modelling the weld pool in welding long sheet structures using the low-amperage constricted arc with through penetration was carried out. Equations of balance of forces and heat input in the weld pool were derived in an assumption of the gradient-free surface tension coefficient and constant density of the gas flow for the steady-state process of interaction of the molten metal and gas in the weld pool. The equations were used as the basis for investigation of stability of the weld pool in terms of the main similarity criteria for hydrodynamic equilibrium. Optimal parameters of the process of stable interaction of liquid and gas in the weld pool with one capillary-gravity wave on the surface were estimated and the time of development of instability was determined.

It was established that stability of the processes occurring in the weld pool is ensured at certain relationships of inertia gas forces, gravity and surface forces. The inertia gas forces should be higher than the gravity forces in a liquid, but not exceed the capillary forces. The optimal metal thickness comparable with size of a droplet in the weld pool was determined from the condition of equality of three components of the process. The obtained relationship for the optimal metal thickness coincides with the determined one-length of the capillary-gravity wave on the surface of the liquid, at which the velocity of its propagation is minimum. For example, for steel the optimal metal thickness at which the welding process is stable is 0.02 m, the characteristic gas flow rate in this case being 120 m/s for argon.

The estimate of the full time of development of instability of the welding process was compared with the experimental data. The comparison showed that the time of formation of instability and the time of induction of instability were in good agreement. Under conditions of formation of instability determined mostly by the Weber number (vibrational mode) the experimental estimations

Проведено сравнение полученной оценки полного времени развития неустойчивости процесса сварки с экспериментальными данными, которое показало хорошее соответствие продолжительности наступления неустойчивости и длительности индукции неустойчивости. При режиме возникновения неустойчивости, определяемом в основном по числу Вебера (вибрационный режим), экспериментальные оценки дают соотношение полного времени развития неустойчивости к времени индукции как 2:3.

#### ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕХНОЛОГИЮ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ И ИХ СВОЙСТВА. А. А. Радченко (Науч.-исслед. и конструктор.-технолог. ин-т сварки и защита покрытий с опытным, г. Минск, Республика Беларусь).

Отличительной особенностью всех сварочных технологий, основанных на электрошлаковом процессе, является наличие выраженных магнитно-гидродинамических (МГД) явлений, сопровождающих выделение джоулевого тепла расплавленным шлаком. Взаимодействие сварочного тока с собственным магнитным полем (МП) приводит к появлению электромагнитных сил, которые решающим образом определяют гидродинамику сварочной ванны, а следовательно, и процессы тепломассопереноса. Поэтому естественным является путь электромагнитного управления этими процессами.

Как видно из выражения для электромагнитной силы

$\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$ , для этого имеются две возможности. Первая заключается в изменении распределения плотности тока в сварочной ванне, вторая, — в наложении в зону сварки внешнего МП, создаваемого магнитными системами, расположенными вне зоны сварки. Второй подход более перспективен и гибкий, поскольку позволяет не только изменять значение индукции МП, но и управлять ее направлением.

На примере горизонтальной электрошлаковой наплавки рассмотрены возможности внешних электромагнитных воздействий (ВЭВ) на технологию и свойства покрытий, получаемых с использованием порошковых присадочных материалов (ППМ).

Наложение магнитного поля (от 0,04 до 0,075 Тл, когда оно не оказывает влияния на устойчивость протекания электрошлакового процесса) на разогретую шлаковую ванну вызывает изменение МГД обстановки в ней, что приводит к вихревому движению шлаковой ванны в вертикальной плоскости со скоростями потоков, достигающими 0,5 м/с при индукции МП 0,06 Тл, а также к вытеснению с оплавленной поверхности расплавленного жидкого металла вследствие его более высокой электропроводности. В результате обеспечивается ряд технологических преимуществ, таких как увеличение скорости наплавки до 2,5...3,5 м/ч; уменьшение сварочного тока на 20...30 %, способствующее возрастанию коэффициента наплавки; минимизация глубины проплавления основного материала и размеров зоны сплавления; снижение шероховатости поверхности покрытия.

Вследствие более высокой электропроводности частиц ППМ (WC), по сравнению со шлаком, внешнее магнитное поле позволяет управлять их движением. Кроме того, использование поперечных МП

yield the ratio of the full time of development of instability to the time of induction equal to 2:3.

#### IMPACT OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC EFFECTS ON THE TECHNOLOGY OF ELECTROSLAG CLADDING OF COATINGS AND THEIR PROPERTIES. A.A. Radchenko (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus).

All welding technologies based on the electrosag process are characterized by the presence of clearly defined magneto-hydrodynamic (MHD) phenomena which accompany release of Joulean heat by the molten slag. Interaction of the cladding current with the natural magnetic field (MF) leads to formation of electromagnetic forces which have a decisive effect on hydrodynamics of the weld pool and, therefore, the heat and mass transfer processes. So, the electromagnetic control is a natural way of controlling these processes. As can be seen from the electromagnetic force expres-

sion  $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$ , this can be realized in two ways. The first is to change distribution of the current density in the molten metal pool and the second is to superpose the external MF induced by magnetic systems located outside the cladding zone on this cladding zone. The second approach is more promising and flexible, as it makes it possible not only to change the value of induction of MF, but also to control its direction.

Possibilities of applying external electromagnetic effects (EEE) to influence the technology and properties of coatings produced using flux-cored filler materials (FCFM) are considered by an example of horizontal electrosag cladding.

Superposition of a transverse magnetic field (from 0.04 to 0.075 T, where it exerts no effect on stability of the electrosag process) on a heated slag pool causes variations in its MHD condition, which leads to a vortex movement of the slag pool on a vertical plane at flow rates reaching 0.5 m/s at MF induction of 0.06 T, as well as to pressing out of the molten metal from the melting surface, caused by an increased electrical conductivity of the metal. This results in a number of technological advantages, such as increase in the cladding speed to 2.5-3.5 m/h, decrease in the cladding current by 20-30 % causing an increase in the deposition efficiency, minimizing of the depth of penetration of the base metal and sizes of the fusion zone and decrease in roughness of the coating surface.

Because of increased electrical conductivity of the FCFM particles (WC), compared with slag, the external magnetic field enables their movement to be controlled. In addition, the use of the transverse MF makes it possible to change structure of the solidifying metal and markedly refine it compared with the metal deposited without the MF effect. Structural changes are accompanied by improvement of such mechanical properties of the metal as elongation, impact toughness and

дает возможность изменять структуру кристаллизующегося металла, заметно измельчать ее по сравнению с металлом, наплавленным без воздействия МП. Структурные изменения сопровождаются улучшением таких механических свойств металла, как относительное удлинение, ударная вязкость и прочность, наиболее благоприятное сочетание которых достигается при индукции МП 0,06...0,075 Тл. Как показали экспериментальные исследования, ВЭВ обеспечивает возможность управления технологическими параметрами электрошлакового процесса наплавки и физико-механическими свойствами покрытий и получения как композиционных, так и однородных покрытий толщиной 0,5...5,0 мм с требуемым распределением упрочняющей фазы.

#### ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАПАДНО-СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ. М. В. Радченко, В. Г. Радченко, Ю. О. Шевцов (Алтай. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, РФ).

Наряду с традиционными технологиями упрочнения поверхности широко используются высококонцентрированные источники нагрева — плазменная струя, лазерный луч, электронный пучок. Электронный луч является одним из перспективных инструментов для нанесения покрытий.

С 1982 г. благодаря поддержке многих ученых в Алтайском политехническом институте было организовано новое научное подразделение — межвузовская зональная НИЛ электронно-лучевой технологии (НИЛ ЭЛТ), положившая начало новому научному направлению — комплексному фундаментальному и прикладному исследованию процессов создания упрочняющих и защитных покрытий на деталях машин и инструменте (коленчатые валы, поршни, пуансоны, дисковые пилы, запорная арматура и др.). Первые работы коллектива НИЛ ЭЛТ были направлены на решение проблемы упрочнения поверхностных слоев сплавов низкоэнергетическими электронными пучками путем самозакалки из жидкого состояния. Параллельно в Институте сильноточной электроники Томского филиала СО РАН и ИЯФ СО РАН (Новосибирск) изучались различные аспекты процессов обработки поверхности низко- и высокоэнергетическими пучками электронов. По мере накопления научного и производственного опыта в НИЛ ЭЛТ сформировалось новое направление — оплавление электронными пучками покрытий, предварительно нанесенных напылением. Помимо выполнения комплексных фундаментальных исследований плакированных покрытий для различных предприятий региона и страны, сотрудниками НИЛ ЭЛТ было организовано создание комплексов электронно-лучевой аппаратуры.

Результатом логического развития электронно-лучевой технологии плакирования поверхности изделий стало научное и практическое направление прямой порошковой электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) с использованием энергии электронного пучка. Наиболее интенсивно оно стало развиваться с 1990 г. В НИЛ ЭЛТ была создана научная группа, которая в рамках ряда государственных научных программ и грантов занималась исследованиями теплофизических, физико-механических свойств создаваемых покрытий, разработкой специализированного оборудования и оснастки (порошковые

strength, the better combination of which is achieved at MF induction of 0.06–0.075 T.

As proved by experiments, the use of EEE makes it possible to control technological parameters of the electroslag cladding process and physical-mechanical properties of coatings, as well as produce composite or homogeneous coatings with thickness ranging from 0.5 to 5.0 mm and desirable distribution of the hardening phase.

#### ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES USED IN WESTERN-SIBIRIAN REGION OF RUSSIA FOR PRODUCTION OF PROTECTIVE COATINGS. M.V.Radchenko, V.G.Radchenko, Yu.O.Shevtsov (I.I.Polzunov Altajsky State Technical University, Barnaul, Russia).

Along with traditional technologies of surface hardening, the extensive use is made of highly concentrated heat sources, such as plasma jet, laser beam and electron beam. The electron beam is one of the most promising tools for coating deposition.

Thanks to the support rendered by many scientists, in 1982 the Altajsky Polytechnical Institute arranged a new entity — "Interdepartmental Zonal R&D Laboratory for Electron Beam Technology" (R&DL EBT), which laid the basis for a new scientific area - integrated fundamental and applied investigation of processes intended for production of hardening and protective coatings on machine parts and tools (crankshafts, pistons, punches, disk saws, stop valves, etc.).

Initial efforts of the R&DL EBT staff were aimed at solving the problems of hardening of the surface layers of alloys using low-energy electron beams by self-quenching from the liquid state. In parallel, the Institute of High-Current Electronics of the Tomsk subsidiary and the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) investigated various aspects of the surface investigation processes involving low- and high-energy electron beams. With accumulation of scientific and industrial experience, R&DL EBT has formed a new direction, i.e. electron beam glazing of sprayed coatings. In addition to comprehensive fundamental research of the clad coatings for different national enterprises, R&DL EBT has arranged development of packages of electron beam equipment.

The scientific and practical area of direct powder cladding using the electron beam energy was the result of a logical evolution of the electron beam cladding technology. It has received the most active development since 1990. A special research team was arranged at the Laboratory to study thermal-physical and physical-mechanical properties of the coatings, develop specialized equipment and fixtures (powder feeders, beam control devices, cladding manipulators), and train engineering and scientific staff under state programs and grants.

Commercial application of thermal-filament guns for realization of the process of electron beam cladding showed their insufficient reliability. Therefore, the Institute of High-Current Electronics in Tomsk undertook inves-

питатели, приборы управления лучом, манипуляторы для наплавки), а также подготовкой инженерных и научных кадров.

Производственное использование термонакальных пушек для реализации процесса ЭЛН показало их недостаточную надежность, поэтому вопросами совершенствования аппаратуры, повышения ресурса работы, разработки новых пушек с холодным катодом занималась научная группа в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск).

Дальнейшее развитие это направление получило в Институте физики прочности материалов (г. Томск). Таким образом, с 1982 г. по настоящее время в Западно-Сибирском регионе России создана и эффективно функционирует разветвленная кадровая, научная и опытно-производственная база для применения в различных областях эффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий по созданию защитных и упрочняющих покрытий электронными пучками в вакууме.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.** Н. Г. Ремпе, Л. А. Волков, Р. Д. Пчелкин (ООО «Элион», г. Томск, АО «Новосибирский завод химконцентратов», г. Новосибирск, РФ). Разработан и успешно используется метод определения оптимальных параметров сварки для получения сварных швов или проплавления с заданными геометрическими размерами, основанный на создании компьютерной статистической модели, в которой задается взаимосвязь потенциально неограниченного набора параметров электронного источника и их сочетаний с размерами и формой зоны проплавления.

Для проведения экспериментов выбрано цилиндрическое изделие из алюминиевого сплава, в котором выполняли несквозные проплавления в центральной части торцевой стенки. Заданными параметрами являются глубина и внешний диаметр проплавления, а также глубина усадочной лунки. На первом этапе определен набор параметров пушки, при которых обеспечивались бы проплавления с размерами, не выходящими за пределы допусков. Отобраны 12 независимых регулируемых параметров. Предварительными экспериментами установлен примерный диапазон изменения каждого из этих параметров. Далее был использован статистический подход для моделирования процесса формирования области проплавления, применялись и известные статистические методы (планирование эксперимента для сокращения количества опытов; дисперсионный анализ для выявления значимых параметров; регрессионный анализ для построения статистической регрессионной модели). Все виды статистического анализа осуществляли с использованием компьютера в среде статистической аналитической системы SAS.

Данные методы позволили создать статистические модели для каждой из трех характеристик зоны проплавления. Дальнейшие эксперименты проводили на моделях. Путем моделирования выявлены параметры пушки, которые оказывают наименьшее влияние на характеристики проплавления. Для этого был сгенерирован 12-факторный план дисперсионного анализа и выполнен расчет, позволивший сократить количество значимых параметров и упрости-

тиги направлены на улучшение оборудования и увеличение срока его службы, а также разработку новых пушек с холодными катодами.

Эта область была далее развита в Институте физики прочности материалов (Томск).

Поэтому, начиная с 1982 г. и по настоящее время широкая научная и экспериментальная производственная база функционирует в Западно-Сибирском регионе России, которая активна в различных областях эффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий, предназначенных для производства защитных и упрочняющих покрытий электронными пучками в вакууме.

**DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ELECTRON BEAM WELDING BY THE METHODS OF STATISTICAL MODELLING.** N.G. Rempe, L.A. Volkov, R.D. Pchelkin ("ELION", Tomsk, Russia; Stock-Holding Company "Novosibirsk Plant for Chemical Concentrates" Novosibirsk, Russia). The method for determination of optimal welding parameters to provide welds or penetration with preset geometrical sizes has been developed and is currently used to advantage. The method is based on development of a statistical computer model which assigns relationship between the potentially unlimited set of parameters of an electron source and their combinations with size and shape of the penetration zone.

A cylindrical workpiece of aluminium alloy with a non-through penetration made in the central part of its end wall was chosen for experiments. The preset parameters were the depth and outside diameter of penetration and the depth of the shrinkage hollow. The first stage of the experiments included determination of parameters of the electron gun to provide penetration with sizes which are not in excess of the set tolerances. 12 independently regulated parameters were selected. Preliminary experiments established an approximate range of variations of each of the parameters. Further on the statistical approach for modelling the process of formation of the penetration zone, as well as the known statistical methods (experimental design to reduce the number of experiments, analysis of variance to reveal significant parameters, regression analysis to construct a statistical regression model) were used. All kinds of statistical analysis were performed using a computer in the SAS statistical analytical system environment.

These methods allowed statistical models to be developed for each of the three characteristics of the penetration zone. Further experiments were conducted on models. Modelling revealed the gun parameters which had the least effect on the penetration characteristics. For this the 12-factorial design of analysis of variance was generated and computation was made, which allowed the number of significant parameters to be reduced and analysis to be simplified. The new experimental design was then generated on the basis of the data obtained and statistical regression models of formation of the penetration zone were constructed. Results of mo-

тить анализ. На основе полученных данных был вновь сгенерирован и выполнен план эксперимента, построены статистические регрессионные модели формирования зоны проплавления. Результаты моделирования были обработаны специальной компьютерной программой, что позволило установить номиналы технологических параметров сварки и допуски на отклонение от номиналов. Таким образом, расчетным путем был получен технологический режим проплавления.

Проверка полученных на моделях режимов была выполнена на партии из 180 образцов. На всех образцах произведен контроль внешних характеристик проплавления. Произвольно отобраны 30 образцов, изготовлены шлифы для определения глубины и формы проплавления.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная статистическая модель с достаточной точностью отображает реальную связь параметров электронной пушки и характеристик зоны проплавления. Созданная методика используется в настоящее время для выбора оптимальных технологических параметров электронно-лучевой аппаратуры на основе пушек с плазменным катодом при сварке поточных изделий ОАО «Новосибирский завод химконцентратов».

#### **СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОТОЧНОГО СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.**

*Н. Г. Ремпе, А. А. Кислицкий, Н. В. Онучин (ООО «Элион», г. Томск, АО «Новосибирский завод химконцентратов», г. Новосибирск, РФ).* Возможность применения сварочных пушек с плазменным катодом в автоматизированном поточном сварочном производстве при повышенных требованиях к поддержанию заданного режима сварки вызвала определенные сомнения, основанные на предположениях о зависимости параметров плазмы и пучка от ряда неконтролируемых внешних факторов, таких как изменение напуска газа в разрядную камеру, возможная нестабильность давления в рабочей камере при шлюзовой загрузке изделий и т. д.

Нами выполнена работа, направленная на получение статистической информации о стабильности параметров сварки конструкций из алюминиевых сплавов при длительной работе пушки в автоматическом режиме. Данные получены в реальных условиях поточного производства без промежуточной корректировки первоначально заданных электрических параметров электронно-лучевой аппаратуры.

Электронно-лучевой энергокомплекс построен на базе аппаратуры ЭЛА-50/5Т, в состав которой входит пушка с плазменным катодом. Пушка основана на эмиссии электронов из отражательного низковольтного разряда низкого давления с полым катодом. Разрядная система содержит три изолированных «холодных» электрода: полый катод, анод и эмиттерный катод, в большинстве случаев имеющий потенциал полого катода. В разрядной камере создается магнитное поле. В эмиттерном катоде выполняется эмиссионный канал, в котором при наличии внешнего электрического поля локализуется плазменная поверхность. Выходящие из плазмы электроны ускоряются в этом поле, формируются в пучок

дelling were processed using the special software, which made it possible to establish the rated technological parameters of welding and tolerances for deviation from the rated values. Therefore, the technological mode of penetration was determined by computations. The modes determined on the models were tested on a batch of 180 samples. External penetration characteristics were checked on all the samples. 30 arbitrary samples were chosen to make sections for determination of the penetration depth and shape.

The results obtained prove that the developed statistical model reflects with a sufficient accuracy the actual relationship between parameters of the electron beam gun and characteristics of the penetration zone. The method developed is used currently for selection of optimal technological parameters of the electron beam equipment based on guns with plasma cathodes for welding actual pieces at the Novosibirsk Plant for Chemical Concentrates.

#### **STABILITY OF PARAMETERS OF ELECTRON GUNS WITH PLASMA CATHODES UNDER CONDITIONS OF AUTOMATED IN-LINE WELDING PRODUCTION.**

*N.G.Rempe, A.A.Kislitsky, N.V.Onuchin («ELION», Tomsk, Russia; Stock-Holding Company «Novosibirsk Plant for Chemical Concentrates», Novosibirsk, Russia).*

The possibility of using welding guns with plasma cathodes in the automated in-line welding production with increased requirements for maintaining the preset welding conditions caused certain doubts based on assumptions of dependence of the plasma and beam parameters upon the number of non-controllable external factors, such as variations in leak-in of gas into the discharge chamber, probable instability of pressure in the work chamber in sluice loading of workpieces, etc.

We completed the work aimed at obtaining statistical information on stability of parameters of welding aluminium alloy structures in long-time operation of the gun in the automatic mode. The data were obtained under actual conditions of in-line production without intermediate correction of initially set electric parameters of the electron beam equipment.

The electron beam power complex is based on equipment ELA-50/5T, which includes the gun with a plasma cathode. The gun is based on emission of electrons from the reflective low-voltage low-pressure discharge with a hollow cathode. The discharge system comprises three isolated "cold" electrodes: hollow cathode, anode and cathode emitter which in the majority of cases has a potential of the hollow cathode. Magnetic field is formed in the discharge chamber. The emission channel is made in the cathode emitter. The plasma surface is localized in the channel in the presence of an external electric field. Electrons leaving the plasma are accelerated in this field, form a beam and are fixed by the magnetic field of the focusing system. The gun design is based on the use of metal-ceramic units whose vacuum tightness and mechanical strength are ensured by the electron beam welding.

и фокусируются магнитным полем фокусирующей системы. В конструкции пушки использованы металлокерамические узлы, герметичность и механическая прочность которых обеспечивается электронно-лучевой сваркой.

Для совмещения пушки с аппаратурой ЭЛА-50/5Т, разработанной под термокатодную пушку, проведена ее модернизация. Вместо блока накала и смещения в аппаратуру введен блок питания разряда, дополнительно разработан и согласован с аппаратурой программатор цикла сварки, предназначенный для автоматического запуска пушки от внешнего сигнала, изменения тока пучка по заданному закону и управления режимами фокусировки и развертки пучка.

Цикл сварки разбит на пять последовательно выполняемых этапов: ввод тока пучка ( $t_0-t_1$ ), прогрев изделия ( $t_1-t_2$ ), ввод тока до амплитуды, заданной режимом сварки ( $t_2-t_3$ ), сварка ( $t_3-t_4$ ), вывод тока ( $t_4-t_5$ ). Длительность каждого из этапов может регулироваться от 0,1 до 10 с с дискретностью 0,1 с. Амплитуда тока на участках прогрева и сварки устанавливается от 0 до 100 мА с дискретностью 1 мА. После завершения цикла сварки выдается команда на поворот манипулятора, затем сваривается следующее изделие.

Работы выполнены на электронно-лучевой установке при сварке поточных изделий ОАО «Новосибирский завод химконцентратов». Установка обеспечивала непрерывную шлюзовую загрузку свариваемых изделий с полным контролем циклов сварки самопишущими приборами.

В общей сложности сварено более 50000 изделий в автоматическом режиме. Анализ сварных швов контрольных образцов показал, что геометрические размеры зоны сварки стабильны и не выходят за пределы заданных допусков.

Выполненная работа показала, что электронные пушки с плазменным эмиттером отличаются набором параметров, позволяющим успешно применять их для многократных процессов сварки в условиях массового поточного производства различных изделий.

**ПУШКА С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ.** Н. Г. Ремпе, И. В. Осипов, О. Е. Троян (Ун-т систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, РФ). Электронные пушки с плазменным катодом уже более двадцати лет применяются в различных технологиях электронно-лучевой сварки. Источником электронов в них, как правило, служит плазма газового разряда. Из многочисленных форм разрядов нами выбран отражательный с полым катодом. К настоящему времени изучены основные закономерности генерации плазмы и формирования луча в электронных пушках на основе отражательного разряда с полым катодом, накоплен большой опыт их промышленной эксплуатации в составе энергокомплексов различного типа. Электронные пушки этого типа успешно работают в составе поточных сварочных линий, используются для нанесения упрочняющих покрытий и в других лучевых технологиях.

Полученные знания позволили создать простую и надежную конструкцию пушки мощностью до 5 кВт. В ее конструкции использованы металлокерамичес-

The gun was upgraded so that it could be combined with the ELA50/5T equipment developed for the thermionic cathode gun. The discharge power unit is used instead of the incandescence and bias units. The welding cycle programmer intended for automatic start up of the gun from an external signal, change in the beam current following the preset law and control of the beam focusing and development modes was additionally developed and interfaced with the equipment.

The welding cycle is broken into five successively performed stages: input of the beam current ( $t_0-t_1$ ), preheating of a workpiece ( $t_1-t_2$ ), input of the current to an amplitude preset by the welding conditions ( $t_2-t_3$ ), welding ( $t_3-t_4$ ) and output of the current ( $t_4-t_5$ ). Time of each of the stages can be regulated from 0.1 to 10 s with a step of 0.1 s. The current amplitude in the preheating and welding stages is regulated from 0 to 100 mA with a step of 1 mA. Upon completion of the welding cycle the manipulator is turned by a command and then the next workpiece is welded.

The works were done using the electron beam unit for welding in-line products of the Novosibirsk Plant for Chemical Concentrates. The unit provided continuous sluice loading of workpieces and complete control of the welding cycles using recording devices.

The total number of pieces welded in the automatic mode is 50,000. Analysis of the welds in control samples showed consistency of the geometrical sizes of the welding zone, not in excess of the preset tolerances.

The work performed shows that the electron guns with a plasma emitter are characterized by such a set of parameters which allow their multiple utilization for welding under conditions of mass in-line production of diverse items.

**GUN WITH PLASMA CATHODE FOR ELECTRON BEAM WELDING.** N.G.Rempe, I.V.Osipov, O.E.Troyan (University for Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia). Electron guns with plasma cathodes have been used for over 20 years in different technologies of electron beam welding. The electron source in them is as a rule the plasma of the gas discharge. Out of many diverse forms of discharge we chose the reflective one with a hollow cathode. Basic principles of generation of the plasma and formation of the beam in the electron guns based on the reflective discharge with a hollow cathode have been investigated and a large experience of their commercial application as part of different types of power complexes has been accumulated. Electron guns of this type are successfully used in the in-line welding production systems, for deposition of hardening coatings and in other technologies.

The knowledge obtained allowed a simple and reliable design of the gun with a capacity of up to 5 kW to be developed. The gun comprises metal-ceramic units whose vacuum tightness and mechanical strength are provided by electron beam welding.

кие узлы, герметичность и механическая прочность которых обеспечиваются благодаря использованию электронно-лучевой сварки.

Основу пушки составляет неразборный металлокерамический узел, состоящий из высоковольтного керамического изолятора и разрядной камеры. Разрядная камера состоит из трех электрически изолированных металлокерамическими изоляторами электродов: анода, полого и эмиттерного катодов. Катод разрядной камеры и магнит выполнены съемными для облегчения чистки разрядной камеры после длительной эксплуатации пушки. Эмиттерный катод содержит канал для выхода электронов из разрядной камеры в ускоряющий промежуток.

Разрядная камера с высоковольтным изолятором устанавливается в корпусе пушки. В ограниченный корпусом и высоковольтным изолятором объем заливается трансформаторное масло.

Для обеспечения необходимых рабочих характеристик разряда требуется поддерживать в разрядной камере давление газа (как правило, воздуха) около 1 Па. В связи с этим в источнике имеется система дозированного напуска газа. Рабочий газ через натекатель, регулирующий напуск, поступает в разрядную камеру по диэлектрической трубке через канал в полом катода.

Электронная пушка имеет следующие параметры: режим работы — непрерывный, импульсный; ток луча — до 0,1 А; ускоряющее напряжение — до 50 кВ; диаметр сфокусированного луча — 0,4...0,6 мм; ток разряда — до 0,3 А; напряжение горения разряда — до 400 В; напуск газа в разрядную камеру — 30...200 см<sup>3</sup>/атм/ч.

Эмиссионная система пушки обеспечивает высокую стабильность электронно-оптических параметров луча. Так, например, изменение положения фокальной плоскости луча во всем диапазоне регулирования тока луча или напуска газа не превышает нескольких миллиметров.

Отсутствие накаливаемых деталей в пушке обеспечивает ее надежную работу в условиях технологического вакуума (около  $5 \cdot 10^{-4}$  Торр) без дополнительной откачки и специальных мер защиты катода. Особенно эффективно применение пушки для сварки или обработки легкоиспаряющихся, химически активных материалов.

#### НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ РОТОРОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ.

И. Л. Ровенский (Конструк. бюро по двигателестроению, г. Харьков, Украина), Н. И. Пинчук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). В двигателях с газовыми турбинами применяют роторы с механическим креплением к диску лопаток «замковым» соединением. Однако более простым и экономичным способом крепления является сварка. Значительный экономический эффект дает исключение высокоточной механической обработки мест крепления, а уменьшение количества «надрезов» при устранении «замков» приводит к повышению усталостной прочности соединения и, соответственно, к возрастанию надежности сварного ротора. Кроме того, улучшению параметров турбины способствует высокая точность геометрических размеров сварных роторов.

Многие высокожаропрочные никелевые сплавы, из которых выполняются газотурбинные лопатки, не

The gun is based on a non-dismantable unit which consists of a high-voltage ceramic insulator and discharge chamber. The discharge chamber consists of three electrically insulated metal-ceramic electrodes: anode, hollow cathode and cathode emitter. The cathode in the discharge chamber and magnet are made removable to facilitate cleaning of the discharge chamber after long-time operation of the gun. The cathode emitter comprises a channel for exit of electrons from the discharge chamber into an acceleration gap.

The discharge chamber with a high-voltage insulator is installed in the gun casing. The space contained between the casing and the high-voltage insulator is filled with transformer oil.

To ensure the required service characteristics of the discharge, it is necessary to maintain gas (most often it is air) pressure of about 1 Pa in the discharge chamber. For this the source is equipped with a system of the portioned gas feed. Working gas through a leak-in device regulating its feed enters into the discharge chamber via a dielectric tube through the channel in the hollow cathode.

The electron gun has the following parameters: working conditions — continuous or pulsed, beam current — up to 0.1 A, accelerating voltage — up to 50 kV, diameter of the focused beam — 0.4–0.6 mm, discharge current — up to 0.3 A, discharge burning voltage — up to 400 V, leak-in of gas into the discharge chamber — 30–200 cm<sup>3</sup>/atm/h.

The emission system of the gun provides a high stability of the electron-optic parameters of the beam. For example, variation in the position of the focal plane of the beam over the entire range of regulation of the beam current or gas leak-in is no more than a few millimeters. The absence of hot parts in the gun provides its reliable operation under conditions of the process vacuum (about  $5 \cdot 10^{-4}$  Torr) without additional evacuation and special means for protection of the cathode. The use of the gun is especially efficient for welding or treatment of volatile and reactive materials.

#### NEW CAPABILITIES OF THE TECHNOLOGY OF WELDING GAS TURBINE ROTORS MADE FROM NICKEL ALLOYS.

I. L. Rovensky (Design Bureau for Engine Construction, Kharkiv, Ukraine), N. I. Pinchuk (E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Gas turbine engines comprise rotors in which blades are fixed to disks by mechanical "lock" type joining. However, welding is a simpler and more cost effective method for such fixation. Avoiding high-accuracy machining of the fixation locations provides considerable saving, and reduction of the number of undercuts in removal of locks leads to increase in fatigue strength of the joints and, therefore, to improvement in reliability of the welded rotor. In addition, high accuracy of geometrical dimensions of the welded rotors provides a decrease in parameters of the turbine.

Many heat-resistant nickel alloys from which the gas turbine blades are made are hard to weld. This is especially true for alloys with an aluminium content of more than 3 %. The cause of cracking of alloys in welding is

поддаются сварке, особенно сплавы с содержанием алюминия более 3 %. Причиной растрескивания сплавов при сварке является образование по границам кристаллитов прослоек жидкой фазы вследствие сегрегации ликвирующих элементов (S, P, O, B, Ce, Si). Под действием сварочных напряжений оплавленные границы раскрываются с образованием горячих ликвационных трещин.

Среди исследованных никелевых лопаточных сплавов с содержанием более 3 % Al не были обнаружены сплавы, удовлетворяющие даже самым жестким режимам сварки. При термо- и металлографическом анализе сплава ЖС6-У (6 % Al) вблизи температуры солидуса на границах кристаллитов отмечено образование прослоек жидкой фазы, которой может быть эвтектика  $\gamma + \gamma'_{пер}$ .

В основу работ по созданию новой технологии изготовления роторов для газовых турбин двигателей наземных транспортных средств была положена разработка лопаточного сплава с улучшенной свариваемостью. Опробован вариант двухфазного никелевого жаропрочного лопаточного сплава. В качестве второй первичной фазы для никелевых высокожаропрочных сплавов с матрицей  $\gamma$ -твердый раствор легирующих элементов в никеле была выбрана эвтектика  $\gamma + \gamma'_{пер}$ . Композиция сплава типа Ni-6Cr-6Al-6Nb обеспечила образование в металле околошовной зоны хорошо сформированной двухфазной структуры. Дополнительно для упрочнения в сплав были введены W, Mo и микродобавки (B, Ce, Zr, Y) в обычном для сплавов этого типа количестве. Титан и кобальт не вводили.

Исследования показали, что для упрочнения никелевого твердого раствора сплава Ni-6Cr-6Al легирование ниобием (до 8 %) более эффективно, чем титаном. Ниобий входит в состав всех основных упрочняющих фаз (твердого раствора —  $\gamma$ , интерметаллидной фазы —  $\gamma'_{пер}$ , дисперсной упрочняющей фазы —  $\gamma'$  и карбидных фаз). Уменьшая растворимость алюминия, ниобий способствует повышению количества дисперсной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы [Ni<sub>3</sub> (Al, Nb, Mo, W)], повышает ее термодинамическую устойчивость, а также рабочую температуру сплава. Содержание дисперсной упрочняющей интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы в сплаве указанного типа составляет 60...65 %. Новый лопаточный сплав ЛЖ-1И по уровню механических характеристик близок к другим сплавам с 6 % Al (например, к сплаву ЖС6-У), но превосходит их по пластическим свойствам и усталостной прочности. Полученный способом вакуумно-индукционной выплавки сплав имеет равноосную структуру кристаллитов  $\gamma$ -твердого раствора с отдельными конгломератами эвтектики ( $\gamma + \gamma'_{пер}$ ) в количестве 4...8 % объема. В структуре металла околошовной зоны при аргоно-дуговой сварке ( $I_{св} = 60...110$  А) эвтектическая фаза имеет вид сетки мелких конгломератов в значительно большем объеме (до 12...20 %), в то время как ее содержание в сплаве ЖС6-У не превышает 1...3 %. Одновременно с увеличением содержания второй фазы сплав ЛЖ-1И по сравнению со сплавом ЖС6-У имеет более узкий интервал ТИХ. Литье лопаток из сплава ЛЖ-1 И ВИ (заготовки ЧМК) с 1996 г. выполняет завод «Мотор-Сич» (г. Запорожье). По разработанной нами совместно с ИЭС технологии изготовления сварных роторов литье

the formation of interlayers of a liquid phase along the crystalline grain boundaries, which are caused by segregation of the liquation elements (S, P, O, B, Ce, Si). Under the effect of welding stresses the melted boundaries are displaced to form hot segregation cracks.

Among investigated nickel alloys with an aluminium content of more than 3 % we found no alloys which met even the most moderate welding conditions. Thermal analysis and metallography of the ZhS6-U alloy (6 % Al) revealed formation of the liquid phase interlayers, which could be the  $\gamma + \gamma'_{пер}$  eutectic, at the crystalline grain boundaries at a temperature close to the solidus point.

The work on development of a new technology for the manufacture of rotors for gas turbine engines of ground vehicles was based on development of a blade alloy with improved weldability. The variant of a two-phase heat-resistant blade nickel alloy was tried out. They +  $\gamma'_{пер}$  eutectic was selected as the second primary phase for heat-resistant nickel alloys with a matrix of  $\gamma$ -solid solution of alloying elements in nickel. Alloy with a composition of the Ni-6Cr-6Al-6Nb type provided a well-formed two-phase structure in the HAZ metal. W and Mo, as well as minor additions (B, Ce, Zr, Y), in the amount usual for this type of alloys were added to this alloy for reinforcement.

Investigations show that alloying with niobium (to 8 %) is more efficient than titanium to harden nickel solid solution of alloys Ni-6Cr-6Al. Niobium is contained in the composition of all basic hardening phases (solid solution —  $\gamma$ , intermetallic phase —  $\gamma'_{пер}$ , dispersion-strengthening phase —  $\gamma'$  and carbide phases). By decreasing solubility of aluminium, niobium promotes improvement of quality of the dispersion-strengthening  $\gamma'$  phase [Ni<sub>3</sub> (Al, Nb, Mo, W)] and increases its thermodynamic stability and working temperature of the alloy. The content of dispersion-strengthening intermetallic  $\gamma'$ -phase in this type of the alloy is 60–65 %. The new blade alloy LZh-1I is close to other alloys with 6 % Al (e.g. ZhS6-U) in the level of mechanical properties, but is superior to them in ductile properties and fatigue strength.

The alloy produced by vacuum-induction melting has an equiaxed structure of crystalline grains of  $\gamma$ -solid solution with individual conglomerates of eutectic  $\gamma + \gamma'_{пер}$  in the amount of 4–8 vol. %. In the HAZ metal structure produced by argon-arc welding (at a welding current of 60–110 A) the eutectic phase has the form of a mesh of fine conglomerates in a sufficiently large volume (up to 12–20 %), whereas its content of the ZhS6-U alloy is not in excess of 1–3 %. Along with an increase in the content of the second phase, the LZh-1I alloy has a smaller brittle temperature range than the ZhS6-U alloy. Casting of blades of the LZh-1I VI alloy (ChMK billets) is done by the "Motor-Sich" Factory (Zaporizhyya). The technology developed in collaboration with the E.O. Paton Electric Welding Institute for the manufacture of welded rotors is used for welding cast blades of the LZh-1I alloy to a wrought disk of the EI 698 VD alloy by the mechanized argon-arc welding method. Distribution of aluminium in a welded joint of the rotor in a region of the blade-weld transition exhibits a smooth variation (in the fusion line in the blade — 6.5 %, in the weld near

лопатки из сплава ЛЖ-1И приваривают к кованому диску из сплава ЭИ 698 ВД способом аргоно-дуговой механизированной сварки. Распределение алюминия в сварном соединении ротора на участке перехода лопатка-шов показывает его плавное изменение (на линии сплавления у лопатки 6,5 %; шов у линии сплавления 5...4 %; шов 3,0...2,5 %). Содержание других легирующих элементов в металле шва следующее: молибден 8,5...11,8 %; вольфрам 4,0...6,5 %; хром 14,5...18,6 %. Показатели механических свойств сварного соединения ротора практически равны таковым материала диска (сплав ЭИ 698 ВД). Предел длительной прочности сварного соединения за 100 ч при 750 °С составляет 360 МПа. Технология изготовления сварных роторов из указанных выше сплавов успешно внедрена в производство на Заводе им. Малышева в г. Харькове.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПРОЦЕССОВ для изготовления штампов холодной высадки.** А. И. Рожков, А. А. Радченко (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). Инструментально-штамповые производства машиностроительных предприятий Беларуси в последние годы испытывают острую нехватку высококачественных материалов для изготовления штампового инструмента и оснастки. Одним из путей решения проблемы является изготовление заготовок штампов способом электрошлакового переплава (ЭШП) неделовых отходов производства и конверсионного лома никельсодержащих конструкционных сталей.

Электрошлаковые заготовки штампов изготавливали на участке ЭШП ПО «БелАЗ» плавкой в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 110 мм по двум вариантам технологии: путем переплава лома конверсионной стали марки 38ХНЗМФА без изменения химического состава, а также совместной плавкой скрапа марок 38ХНЗМФА и У10 в таком соотношении, чтобы обеспечить уровень углерода 0,5...0,6 % для получения аналога стали распространенной марки 5ХНМ (условное обозначение 5ХНЗМФА).

Скорость наплавки выбирали по специально разработанной методике расчета из условия подавления ликвационных явлений и обеспечения высокой дисперсности структуры металла на всем сечении заготовки.

После традиционной для данного случая многоступенчатой термообработки механические свойства литого металла заготовок из стали 38ХНЗМФА соответствуют уровню свойств проката той же марки, а из стали 5ХНМ — уровню свойств поковок из стали марки 5ХНМ.

Для повышения твердости и износостойкости инструмента рабочие поверхности наиболее нагруженных штампов упрочняли цементацией и азотированием с последующей окончательной термообработкой по специально разработанным режимам. Твердость упрочненных химико-термической обработкой рабочих поверхностей штампов соответствует требованиям конструкторской документации на штампы для холодной высадки листа толщиной 1...4 мм. Толщина упрочненного слоя вполне достаточна для неоднократной переточки инструмента. Сердцевина штампа после термообработки сохраняет высокую вязкость,

the fusion line — 5–4 %, in the weld — 3.0–2.5 %). The content of other elements in the weld metal is as follows: molybdenum — 8.5–11.8 %, tungsten — 4.0–6.5 %, chromium — 14.5–18.6 %. Mechanical properties of the welded joint in the rotor are almost equal to those of the disk material (EI 698 VI alloy). The long-time strength level of the welded joints on the base of 100 h at 750 °C is 360 MPa.

The technology for making welded rotors from the above alloys has been successfully applied at the Malyshev Plant in Kharkiv.

#### APPLICATION OF ELECTROSLAG TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURE OF COLD UPSETTING DIES.

A.I.Rozhkov, A.A.Radchenko (Research and Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus). Die-tool production plants of machine-building enterprises of Belarus have currently a dramatic shortage of high-quality materials for the manufacture of dies and tools. One of the ways of solving this problem is to make billets of dies by electroslag remelting of off-standard production wastes and conversion scrap of nickel-containing structural steels. Electroslag billets of the dies were made at the ESR workshop of PO "BelAZ" by melting in a copper water-cooled mould 110 mm in diameter using two versions of the technology: by remelting scrap of conversion steel 38KhN3MFA without changing its chemical composition and by combined melting of scrap of the 38KhN3MFA and U10 grades in such a ratio that the level of carbon equal to 0.5–0.6 % is ensured to produce an analogue of steel of the widely applied 5KhNM grade (conditional designation — 5KhN3MFA).

The melting rate was selected by a specially developed calculation procedure on the basis of suppression of segregation phenomena and ensuring a high degree of dispersion of the metal structure across the entire section of the billet.

After multi-stage heat treatment, which is traditional for this case, mechanical properties of the cast metal of billets of steel 38KhN3MFA correspond to the level of properties of rolled products of the same steel grade, while those of steel 5KhN3MFA correspond to the level of properties of forgings of steel 5KhNM.

To increase hardness and wear resistance of dies, working surfaces of the most highly loaded dies were hardened by carburizing and nitriding, followed by finishing heat treatment under the specially developed conditions. Hardness of the working surfaces of the dies after thermo-chemical treatment meets requirements specified in technical and design documents for the dies for cold upsetting of a sheet material 1–4 mm thick. Thickness of the hardened layer is sufficient for multiple resharpenings of the dies. The core of the die after heat treatment preserves high toughness, which provides increased resistance to impact loads.

Operation tests of dies made from electroslag billets conducted at PO "BelAZ" showed an increase of up to 5 times in life of the dies, as compared with the dies made from steel of the U8, U10 and R6M5 grades, which

что обеспечивает повышенную стойкость при ударных нагрузках.

Эксплуатационные испытания штампов из электрошлаковой заготовки, проведенные на ПО «БелАЗ», показали повышение ресурса инструмента до 5 раз по сравнению со штампами из сталей марки У8, У10, Р6М5, которые применяются на предприятиях в условиях дефицита более дорогостоящих штамповых сталей. Отмечена повышенная стойкость штампов против выкрашивания острых рабочих кромок. При этом себестоимость изготовления электрошлаковой заготовки по рассмотренной технологии в 1,5...2,0 раза ниже стоимости поковки аналогичной марки стали.

#### ВЫБОР АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭЛС.

Е. Н. Румянцев, В. О. Токарев (ФГУП НПО «Техномаш», г. Москва, РФ). Основной технологический процесс является алгоритм контроля и управления параметрами электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

Управление механическими перемещениями сварочного оборудования и/или свариваемой детали, основными параметрами энергокомплекса, коррелированное управление токами сварки и фокусировки на участке начало/окончание сварного шва по заранее заданной жесткой программе реализовано и применяется в промышленных условиях.

Проблемы управления отдельными параметрами процесса ЭЛС непосредственно в ходе сварки при номинальной мощности сварочного луча, а тем более управления всей совокупностью основных параметров процесса, в ряде случаев не нашли своего практического решения.

Приблизиться к решению указанных проблем можно, если принять, что процесс ЭЛС представляет собой некоторую физическую систему  $R$ , функционирующую в непрерывном или дискретном времени и включающую в свой состав подсистемы  $r_1, r_2, \dots, r_m$ . Система  $R$  в каждый момент времени может находиться в одном из состояний  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Каждому состоянию  $A_n$  соответствуют счетное множество состояний  $B_1, B_2, \dots, B_m$  каждой из подсистем  $r_m$ . Состояние  $A_n$  зависит как от фиксированных (заданных заранее) параметров подсистем, так и от результата одновременного взаимодействия двух или нескольких подсистем между собой. Например, состояние  $A_n$ , соответствующее требуемому диаметру фокального пятна на поверхности свариваемой детали, зависит от радиальных биений детали, тока фокусирующей магнитной линзы и т. д. Переходы из  $A_n$  в  $A_{n+1}$  и из  $B_m$  в  $B_{m+1}$  происходят непрерывно, но в первом приближении можно сделать предположение о временной дискретности таких переходов. Кроме того, корреляция параметров различных участков сварного шва выражена достаточно слабо. Это позволяет сделать вывод о независимости имеющегося в данный момент состояния  $A_n$  системы  $R$  от предыдущего состояния. Идентификация состояния системы (или подсистемы) осуществляется по результатам обработки выходных сигналов датчиков. С целью увеличения вероятности принятия правильного решения и повышения помехоустойчивости целесообразно использовать для контроля одного параметра несколько датчиков, реализованных на различных физических принципах.

are usually used by enterprises because of shortage of more expensive die steels. An increased resistance of the dies to spalling of sharp working edges was noted. The cost of production of an electroslog billet made by the technology described is 1.5–2.0 times lower than that of a forging made from the similar steel grade.

#### SELECTION OF ADAPTIVE ALGORITHM TO CONTROL THE EBW PROCESS. E.N.Rumyantsev, V.O.Tokarev (FGUP NPO "Tekhnomash", Moscow, Russia).

Technological process is based on an algorithm to monitor and control the electron beam welding (EBW) parameters.

Control of mechanical displacements of the welding equipment and/or workpiece and basic parameters of the power supply, as well as correlated control of the welding current and focusing on the "weld start/end" region following the preset rigid program have been developed and are now commercially applied.

The problems of control of individual parameters of the EBW process directly during welding at a rated power of the electron beam and, moreover, control of the entire set of the basic parameters of the process have found no practical solution for a number of cases.

However, we can come closer to finding solutions to these problem if we assume that the EBW process is a certain physical system  $R$  which functions in a continuous or discrete time and includes subsystems  $r_1, r_2, \dots, r_m$ . At each time moment system  $R$  can be in one of states  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Each state  $A_n$  corresponds to a countable set of states  $B_1, B_2, \dots, B_m$  for each of subsystems  $r_m$ . State  $A_n$  depends both upon the fixed (preset) parameters of the subsystems and upon the result of simultaneous interaction of two or more subsystems between each other. For example, state  $A_n$  corresponding to the required diameter of the focal spot at the workpiece surface depends upon the radial play of the workpiece, current of the focusing magnetic lens, etc. Transitions from  $A_n$  to  $A_{n+1}$  and from  $B_m$  to  $B_{m+1}$  occur continuously, but in the first approximation we can assume a time discreteness of such transitions. In addition, correlation of parameters of different regions of the weld is slight enough. This allows a conclusion that state  $A_n$  of system  $R$  at a given time moment is independent of the previous state. Identification of the state of the system (or subsystem) is done by the results of processing of output signals of transducers. To increase the probability of a right decision and improve noise-proofness, it is advisable to use several transducers based on different physical principles to control one parameter.

This offers the possibility of making a description of all states  $A_n$  of system  $R$  and corresponding states  $B_m$  of subsystems  $r_n$  required for performance of the EBW process. The control algorithm is based on the following diagram: identification of the state of the system, including the state of the subsystems, estimation of the probability  $B_m$  of producing a welded joint with preset parameters at a current state, selection of a new state cor-

Представляется возможность составить описание всех необходимых для проведения ЭЛС состояний  $A_n$  системы  $R$  и соответствующих им всех возможных состояний  $B_m$  подсистем  $G_m$ . Управляющий алгоритм реализуется по схеме: идентификация состояния системы, включая состояние подсистем; оценка вероятности  $Q$  получения сварного соединения с заданными параметрами при текущем состоянии; выбор нового состояния, которому соответствуют максимальное значение  $Q$  и формирование управляющего воздействия для перехода в это состояние. Алгоритм, реализованный по указанной схеме и осуществляющий вероятностную оценку параметров процесса ЭЛС, а также воздействие на них в реальном масштабе времени, является адаптивным.

**СВАРКА КОМПОЗИЦИОННОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МАГНИЯ.** В. Р. Рябов, А. Г. Ясинский (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Применение магния и магниевых сплавов в качестве матрицы композитов, армированных высокопрочными и высокомодульными волокнами, позволяет создавать самые легкие конструкционные материалы с повышенными удельной прочностью, жаропрочностью и модулем упругости. Для армирования магния и его сплавов применяют высокопрочную стальную и титановую проволоку, волокна бора и углерода, нитевидные кристаллы карбида кремния. Большое преимущество магниевых сплавов, используемых в качестве матрицы КМ, заключается в том, что они практически не реагируют с армирующими волокнами основных классов. Именно это обстоятельство позволяет использовать сварку плавлением для получения магниевых конструкций.

Исследована композиция Mg-B, являющаяся инженерным материалом, используемым в авиационной технике. Отработку технологии аргоно-дуговой и микроплазменной сварки производили на композиционном материале ВКМ-1 толщиной 1...2 мм, полученном способом диффузионной сварки пакета фольги из сплава МА2-1 и борного волокна (ТУ 6-02-877). Объемная доля волокон составляла 50 %. Сварку стыковых соединений производили с двух сторон с подачей присадочной проволоки марки МА-2 диаметром 1,5 мм. Испытаны образцы, сваренные вдоль и поперек волокон. При исходной прочности ВКМ-1 1100 МПа достигнута прочность соединения (при сварке вдоль волокон) 900...960 МПа.

Стабильность волокон бора в магниевой матрице и небольшое межфазное взаимодействие на границе раздела матрица-волокно было подтверждено микроструктурным анализом.

**ФІЗИКО-МЕТАЛУРГІЙНА СУМІСНІСТЬ І ЗАКОНОМІРНОСТІ ВЗАЄМОДІЇ РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ ПРИ ПАЯННІ.** С. М. Самохін (Укр. держ. мор. техн. ун-т, м. Миколаїв, Україна). В потужних енергетичних пристроях, що застосовуються в ядерній та космічній техніці, важливе місце належить паяним високотемпературним модулям із різномірними сполученням тугоплавких металів, дисперсно-зміцненної міді, хромонікелевих сталей і сплавів. Традиційний підхід до застосування припоїв і розробки технологій паяння різномірних металів не забезпечує отримання конструкцій з необхідними експлуатаційними пара-

responding to a maximum value of  $Q$  and formation of the control effect for transition to this state.

The algorithm based on this diagram and making the probability estimation of the EBW process parameters, as well as affecting them in real time is adaptive.

**WELDING OF A MAGNESIUM-BASED FIBROUS COMPOSITE MATERIAL.** V.R. Ryabov, A.G. Yasinsky (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Application of magnesium and magnesium alloys as the matrix of composite materials (CM) reinforced with high-strength and high-modulus fibres, permits development of the lightest structural materials with an increased specific strength, high-temperature strength and modulus of elasticity.

Magnesium and its alloys are reinforced with high-strength steel and titanium wire, boron and carbon fibres, silicon carbide whiskers. A great advantage of magnesium alloys used as CM matrix consists in that they practically do not react with the reinforcing fibres of the main classes. This is exactly the feature which allows fusion welding to be used for magnesium structures fabrication.

Mg-B composition was studied which is the structural material used in aircraft engineering. Optimisation of argon-arc and microplasma welding technology was performed on VKM-1 composite material 1-2 mm thick produced by diffusion welding of a pack of MA2-1 alloy foil and boron fibre (TU 6-02-877). The fibre volume fraction was 50 %. Double-sided welding of butt joints was performed with MA-2 filler wire of 1.5 mm diameter. Samples welded along and across the fibres were tested. With VKM-1 initial strength of 1100 MPa, the joint strength of 900-960 MPa was achieved (in welding across the fibres).

The stability of boron fibres in the magnesium matrix and weak interaction on the matrix-fibre interface were confirmed by microstructural analysis.

**PHYSICAL-METALLURGICAL COMPATIBILITY AND LAWS OF INTERACTION IN BRAZING DISSIMILAR METALS.** S.M. Samokhin (Ukr. State Marine University, Mykolayiv, Ukraine). Brazed high-temperature modules with dissimilar joints of refractory metals, dispersion-strengthened copper, chromium-nickel steels and alloys have a significant place in high-capacity power units used in nuclear and aerospace engineering. The traditional approach to the use of braze alloys and development of dissimilar metal brazing technologies does not permit fabrication of structures with the required performance and lowers the effectiveness of the use of

метрами, зменшує ефективність використання високотемпературних властивостей нових конструкційних матеріалів. У зв'язку з цим важливими є заходи щодо подальшого вдосконалення технологій паяння і складу припоїв з урахування чинників, що перешкоджають підвищенню рівня експлуатаційних параметрів високотемпературних енергетичних пристроїв.

До головних негативних чинників, що обумовлюють проблеми при паянні вузлів з різномірних металів та з їх працездатністю в умовах високих температур, належать такі:

- велика розбіжність показників фізико-металургійних властивостей з'єднуваних матеріалів, висока реакційна схильність тугоплавких металів до утворення з переважною більшістю інших металів крихких та твердих інтерметалідних сполук типу  $\sigma$ -,  $\eta$ -,  $\mu$ -, або  $\rho$ -фаз;
- значна розбіжність показників капілярних властивостей і параметрів взаємодії припоїв і депресантів з металами, що складають різномірне з'єднання, а також переважна частина металу з нижчою температурою плавлення в процесах взаємодії, формування структури та фазового складу металу шва, якісних і службових показників паяних з'єднань;
- вплив часток зміцнюючої фази на процеси контактної взаємодії припоїв та формування паяних швів дисперсно-зміцненої міді;
- велика розбіжність показників фізико-механічних властивостей з'єднуваних металів, високий рівень залишкових термічних напружень та їх нерівномірний розподіл.

Тому при виготовленні різномірних паяних вузлів високотемпературного призначення за участю тугоплавких металів необхідно вирішити два головних завдання. По-перше, треба визначити:

- базові системи припоїв;
- напрямки їх легування та вибір депресантів, що сприяють запобіганню знеміцненню паяних матеріалів, затримці утворення інтерметалідних крихких прошарків, підвищенню хімічної однорідності металу шва, врівноваженню параметрів контактної взаємодії і дифузійного масообміну, стабілізації високотемпературних службових властивостей з'єднань.

Друге завдання полягає в зменшенні рівня залишкових термічних напружень шляхом комп'ютерної оптимізації конструкційних параметрів вузла, фізико-механічних властивостей з'єднуваних матеріалів з урахуванням режимів паяння і експлуатації в умовах високих температур.

На основі вивчення хімічного і фазового складу паяних з'єднань, кінетичних параметрів міжфазної взаємодії встановлено закономірності формування термо-стабільних і жароміцних паяних з'єднань дисперсно-зміцненої міді з тугоплавкими металами, нержавіючих сталей аустенітного і феритного класів з молібденом, хромонікелевих сплавів і сплавів ванадію, ніобію і танталу з молібденом і вольфрамом. Вивчено вплив депресантів, легуючих елементів припоїв та домішок основних металів на будову та якісні показники різномірних паяних з'єднань. З урахуванням виявлених закономірностей експериментально та за допомогою комп'ютерного прогнозування температури плавлення багатоконпонентних сплавів розроблено нові системи припоїв, підібрано

high-temperature properties of the advanced structural materials. In this connection important are the measures on further improvement of brazing technologies and braze alloy compositions, taking into account the factors preventing the increase of the level of performance of the high-temperature power units.

The main negative factors giving rise to problems in brazing of dissimilar metal components and their high-temperature performance are as follows:

- great difference in the values of physical-metallurgical properties of the materials being joined, high reactive ability of refractory metals to form brittle and hard intermetallic compounds of the type of  $\sigma$ -,  $\eta$ -,  $\mu$ - or  $\rho$ -phases with the absolute majority of other metals;
- significant difference in the capillary properties and parameters of interaction of the braze alloys and depressants with the metals in the dissimilar joint, as well as the greater part of the metal having lower melting temperature in the processes of interaction, formation of the structure and phase composition of the weld metal, quality and service properties of brazed joints;
- influence of the strengthening phase particles on the processes of contact interaction of the braze alloys and formation of brazed joints of dispersion-strengthened copper;
- great difference in the values of physical-mechanical properties of the metals being welded, high level of residual thermal stresses and their non-uniform distribution.

Therefore, two main problems should be solved in fabrication of dissimilar brazed components containing refractory metals, for high-temperature applications. First, it is necessary to determine: base systems of braze alloys; types of their alloying and selection of depressants which promote prevention of brazed material softening, delaying of the formation of brittle intermetallic layers, improvement of chemical homogeneity of weld metal, harmonising the parameters of contact interaction and diffusion mass transfer, stabilisation of high-temperature performance of the joints.

The second problem consists in lowering the level of the residual thermal stresses by computerised optimisation of the component structural features, physical-mechanical properties of the materials being joined allowing for the brazing modes and high-temperature service conditions.

Investigation of the chemical and phase composition of brazed joints, kinetic parameters of interphase interaction permitted establishment of the laws of formation of thermally-stable and high-temperature resistant brazed joints of dispersion-strengthened copper with refractory metals; stainless steels of austenitic and ferritic classes with molybdenum; chromium-nickel alloys and vanadium, niobium and tantalum alloys with molybdenum and tungsten.

The influence of depressants, alloying elements of braze alloys and additives to the base metal on the structure and quality characteristics of dissimilar brazed joints has been studied. New braze alloy systems have been developed, material combinations, brazing modes and brazed joint geometries ensuring fabrication of high-capacity power units for high-temperature applications have been selected experimentally and by computer forecasting of the melting temperature of multicomponent alloys, taking into account the found dependencies.

сполучення матеріалів, режими паяння та конструкційні типи паяних з'єднань, які забезпечують виготовлення потужних високотемпературних енергетичних пристроїв.

Використання припоїв Ni(Fe)-(Si)B, Ni-(Si)B-V дозволяє підвищити температуру тривалої роботи з'єднань нержавіючих сталей із сплавами молибдену до 700 °C, а короточасної — до 900 °C. При паянні хромонікелевих сплавів із сплавами молибдену і вольфраму припоями Ni-Zr та Ni-Hf доведено необхідність їх легування елементами, що збільшують взаємну розчинність з'єднуваних металів, уповільнюють формування прошарків  $\mu$ - та  $\rho$ -фаз. Робоча температура паяних з'єднань у цьому разі може сягати 1200 °C.

Для паяння різномірних сплавів тугоплавких металів розроблено припої на основі сплавів Ti-V-Zr, Ti-Zr-Cr, Ti-V-Cr, V(Ti)-Cr-Nb, які забезпечують тривалу роботу паяних вузлів при температурах до 1400 °C. На основі результатів комплексних досліджень закономірностей взаємодії та формування з'єднань розроблено нові припої і технології паяння, які впроваджені на НВО «Енергія» і КБ «Південне».

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БРЫЗГ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ СВАРИВАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ.** С. Б. Сапожков, К. И. Томас, В. Т. Федько (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ). Существенным недостатком способа сварки в  $\text{CO}_2$  является повышенное разбрызгивание металла и связанное с ним забрызгивание поверхности изделий, сборочно-сварочных приспособлений и деталей аппаратуры, которое приводит к необходимости очистки поверхностей от брызг расплавленного металла, увеличению расхода виброинструмента и энергии, что повышает себестоимость изготовления сварных конструкций.

Для определения характера взаимодействия брызг расплавленного металла с поверхностью свариваемого изделия, оказывающего существенное влияние на прочность их сцепления, был проведен анализ микроструктур металла зоны взаимодействия. Известно, что на поверхности брызг, температура которых в начальный момент отрыва от электрода достигает 2970 K, оксидная пленка в основном состоит из FeO. В момент контакта брызг с поверхностью металла, покрытого окалиной, происходит ее плавление. В расплаве атомы оксидной пленки брызг перемешиваются с окалиной на поверхности свариваемого изделия, образуя наименее прочное сцепление (усилие среза составляет 20...50 Н/мм<sup>2</sup>). При изучении сцепления крупных брызг было обнаружено сплавление их с поверхностью изделия, которое происходит только после удаления с участка контакта оксидных пленок. Когда теплоты, содержащейся в капле, достаточно для разрушения (расплавления) слоя окалины, взаимодействие в зоне их контакта происходит за счет самодиффузии поверхностных атомов металла. Однако следует учитывать, что на прочность сцепления в данном случае влияет интенсивность процесса теплоотвода, энергетическое теплосодержание капли и ударное давление в момент контакта. Так, при тех же интенсив-

Application of Ni(Fe)-(Si)B, Ni-(Si)B-V braze alloys allows the temperature of long-term service of joints of stainless steel with molybdenum alloys to be increased up to 700 °C, and that of short-term service up to 90 °C. In brazing of chromium-nickel alloys to molybdenum and tungsten alloys with Ni-Zr and Ni-Hf braze alloys, the need to alloy them with elements increasing the mutual solubility of the metals being joined and slowing down the formation of  $\mu$ - and  $\rho$ -phase interlayers has been proved. The working temperature of the brazed joints in this case can be up to 1200 °C.

Braze alloys of Ti-V-Zr, Ti-Zr-Cr, Ti-V-Cr, V(Ti)-Cr-Nb systems have been developed for brazing dissimilar alloys of refractory metals, thus ensuring long-term performance of brazed components at up to 1400 °C temperatures.

Proceeding from the results of comprehensive investigations of the laws of interaction and joint formation, new braze alloys and brazing technologies were developed, which have been introduced at RPA «Energia» and DB «Pivdenne».

**INVESTIGATION OF INTERACTION OF SPATTERS OF MOLTEN METAL WITH A SURFACE OF WORKPIECE BEING WELDED IN  $\text{CO}_2$  WELDING.** S. B. Sapozhkov, K. I. Tomas, V. T. Fedko (Division of the Tomsk Polytechnical University, Yurga, Russia). The process of  $\text{CO}_2$  welding has the considerable disadvantage of more intensive metal spatter and the associated sticking of the metal to the surface of the items being welded, assembly-welding fixtures and welding equipment components, which increases the labour consumption in the operations of these surfaces cleaning from the molten metal drops, wear of vibration instruments and power consumption, thus raising the cost of welded structure fabrication.

Interaction zone microstructures were analysed to determine the nature of molten metal drops interaction with the surface of the item being welded, which has an essential influence on their adhesion strength.

It is known that on the surface of metal drops whose temperature can be up to 2970 K at the initial moment of separation from the electrode, the oxide film mainly consists of FeO. At the moment of the drops contact with the surface of the metal covered with scale, it is melted. In the melt, the drop oxide film atoms are mixed with the scale on the surface of the item being welded, and the weakest adhesion is produced (shear force is 20 to 50 N/mm<sup>2</sup>).

Study of large drops adhesion revealed their fusion with the surface of the item, which takes place only after the oxide film removal from the contact area. When the amount of heat in the drop is sufficient for destroying (melting) the layer of scale, the interaction in their contact zone proceeds at the expense of self-diffusion of the surface atoms of the metal. It should be taken into account, however, that the adhesion strength in this case depends on the intensity of the heat removal process, thermal energy of the drop and impact pressure at the moment of contact. So, at the same intensity and impact pressure, but low heat content, the diffusion process is slowed down (shear force of 60-300 N/mm<sup>2</sup>) and at

ности и ударном давлении, но низком теплосодержании происходит замедление процесса диффузии (усилие среза 60...300 Н/мм<sup>2</sup>), при большом теплосодержании — ускорение процесса диффузии (усилие среза 300...500 Н/мм<sup>2</sup>).

Для подтверждения теоретических предположений исследовали сварные образцы из стали Ст3 с различной шероховатостью. По месту контакта брызг с поверхностью образца были сделаны макро- и микрошлифы, исследования осуществляли на оптическом микроскопе МИМ-7 при увеличении 100...500. Анализ микроструктур с раскладкой увеличений в зоне контакта капли с поверхностью зафиксировал следующую особенность: на границе их сплавления обнаружен светлый слой феррита, под каплей (Св-08Г2С) — темная область (перлит), плавно переходящая в ферритно-перлитную область основного металла (Ст3), которую на микрошлифе, травленном 4 %-м раствором азотной кислоты в спирте, можно увидеть невооруженным глазом. Ориентировочно определяемое по формуле  $C = 0,8 P/100$  (P — массовая доля перлита в структуре, %) количество углерода под каплей составило 0,04...0,05 %; в темной области — 0,35...0,40 %; в основном металле — 0,25 %. Даже с учетом погрешности при визуальной оценке содержания углерода можно сделать вывод, что вследствие интенсивного теплонасыщения в момент контакта капли с поверхностью при температуре от 200 до 700 °С происходит диффузионное перераспределение углерода вглубь основного металла. В результате перегретая область после удаления капли будет служить концентратором внутренних напряжений, что недопустимо при изготовлении особо ответственных конструкций.

Анализ экспериментальных данных позволил установить, что наиболее прочное сцепление капли с поверхностью, обработанной наждачным кругом, появляется при самодиффузии поверхностных атомов в зоне контакта (сплавление), наименее прочное — при наличии на поверхности (в состоянии поставки) оксидов и различных загрязнений. Следовательно, при прочих равных условиях понизить прочность сцепления брызг с поверхностью свариваемых изделий и деталями сварочной горелки можно путем нанесения на нее защитных покрытий, когда энергетическое теплосодержание капли в момент контакта будет направлено на разложение (удаление) покрытия.

**АЛГОРИТМЫ ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДОВ.** Ю. Н. Сараев, О. И. Шпигунова (Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, РФ). Технология и организация сварки при монтаже непрерывной нитки трубопровода постоянно совершенствуются с целью повышения темпа монтажных работ, главным образом благодаря автоматизации монтажа неповоротных стыков. Большинство попыток автоматизировать сварку неповоротных стыков связано с применением дуговой сварки. Достоинствами автоматической сварки в СО<sub>2</sub> неповоротных стыков трубопроводов из дисперсионно-твердеющих сталей импортного и отечественного производства являются возможность использования сварочной проволоки Св-08Г2С, сокращение времени сварки корневого и заполняющих

high heat content the diffusion process is accelerated (shear force of 300–500 N/mm<sup>2</sup>).

St.3 welded samples with various degrees of roughness were studied in order to confirm the theoretical postulates. Macro- and microsections were cut out in the place of the drops contact with the sample surface and investigations were conducted in MIM-7 optical microscope which allows examination at X100–500 magnification.

Analysis of microstructures at different magnifications of the zone of the drop contact with the surface revealed the following feature: a light-coloured ferrite layer is found on their fusion boundary and a dark area is observed under the drop (Sv 08G2S), namely pearlite smoothly changing to a ferrite-pearlite area of the base metal (St.3) visible to a naked eye in a microsection etched with a 4 % solution of nitric acid in alcohol. When the method of carbon content determination by the area occupied by ferrite and pearlite in the structure, from the following equation:  $C = 0.8 P/100$  (%), where P is the amount of pearlite in the structure, % was used, the carbon content, tentatively, was: 0.04–0.05 % under the drop; 0.35–0.40 % in the dark area; and 0.25 % in the base metal. Even allowing for the error in visual assessment of carbon content, the conclusion can be made that intensive heat saturation at the moment of the drop contact with the surface leads to a diffusion redistribution of carbon into the base metal which proceeds at the temperature from 200 to 700 °C. As result, the overheated region after the drop removal will act as the inner stress raiser, this being inadmissible in fabrication of highly critical structures.

Analysis of experimental data demonstrated that the drop adhesion to the surface treated with an emery wheel is the strongest when the interaction proceeds due to self-diffusion of surface atoms in the zone of contact (fusion) and the weakest when the as-delivered surface has oxides and various contamination, as the oxides on the drop surface fuse with them. Therefore, with other conditions being equal, the strength of the drops adhesion to the surface of the items being welded and the welding torch parts can be reduced by applying protective coatings on it, when the thermal energy of the drop at the moment of contact will be directed to decomposition (removal) of the coating.

**ALGORITHMS OF PULSED CONTROL OF WELDING PROCESS FOR CONSTRUCTION AND REPAIR OF MAIN GAS AND OIL PIPELINES.** Yu.N.Saraev, O.I.Shpigunova (Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Division of RAS, Tomsk, Russia). Currently used technologies and organisation of welding operations in mounting the continuous line of pipelines are being constantly improved to increase the rate of mounting operations performance. One of the methods is automation of position butt mounting. The majority of the attempts at automation of position butt welding are related to arc welding application. Welding in the atmosphere of the most inexpensive and accessible carbon dioxide gas, looks much more attractive compared to other welding processes due to a comparative ease of implementation in case of welding in different positions in space. The advantage of automatic CO<sub>2</sub> welding of position butts of pipelines of imported

слоев, уменьшение поперечного сечения разделки и объема наплавленного металла. Однако ей присущи и недостатки, связанные с наличием дефектов в сварных соединениях, несплавлений по кромкам и между слоями, обусловленных проявлениями неустойчивости процесса сварки, непрерывным изменением пространственного положения сварочной ванны, устранить которые можно путем обеспечения стабильных энергетических характеристик процесса сварки либо изменения их по определенной программе.

Длина только российской части созданной в бывшем СССР системы магистральных трубопроводов для транспортировки природного газа, нефти и продуктов их переработки составляет 208 тыс. км, причем доминируют в ней трубопроводы высокого давления и большого (1220...1420 мм) диаметра. Основная часть магистральных трубопроводов эксплуатируется достаточно длительное время (30 % газопроводов находится в эксплуатации более 20 лет, а 15 % — около 30 лет). Поддержание трубопроводов в работоспособном состоянии требует проведения выборочных плановых ремонтов участков с опасными дефектами путем использования эффективных и универсальных технологий, обеспечивающих восстановление прочности и долговечности дефектного участка трубопровода до уровня бездефектного, например композитно-муфтовой технологии. При этом сварка является основной технологической операцией, от которой зависит качество ремонта. Применяемая ручная дуговая сварка, особенно для муфт большой длины, приводит к значительным затратам времени, а кроме того, требует высокой квалификации сварщиков.

Дальнейший прогресс в строительстве магистральных трубопроводов, способствующий увеличению темпов монтажа и ремонта, снижению себестоимости сварочных работ при обеспечении требуемого уровня качества и эксплуатационных свойств сварных соединений, возможен за счет внедрения высокопроизводительных адаптивных импульсных технологий сварки и специализированного оборудования. Производительность процесса повышается в 5...6 раз, снижаются требования к квалификации сварщика.

Адаптивные импульсные процессы реализуют корректировку выбранного алгоритма по каналам обратных связей в зависимости от состояния объекта управления — электродинамической системы источника питания—дуга—сварочная ванна—зона сварного соединения. Схемотехническая реализация систем импульсного питания осуществляется путем подключения дополнительных блоков к типовому сварочному оборудованию. Разработанные методами компьютерного конструирования оптимальные алгоритмы управления энергетическими характеристиками процесса ( $I(t)$ ,  $U_d$ ,  $I_{\text{лик}}$ ,  $U_l$ ) позволяют реализовать технологический процесс односторонней импульсно-дуговой сварки корневых швов с формированием обратного валика без дополнительных подкладок и без подварки изнутри в углекислом газе, а также покрытыми электродами. Стабильность такого процесса сварки обуславливает стабильность качества формирования сварного шва, которое определяют временные параметры процесса — частота коротких замыканий, длительность горения

and local precipitation-hardening steels, is the ability to use the widely accepted Sv-08G2S welding wire, shortening of the time for welding the root and filling passes, reduction of the groove cross-section and deposited metal volume. The experience of production trials, however, has revealed a number of disadvantages related to defects in welded joints, lacks-of-fusion along the edges and between the layers due to instability of the welding process, and continuous change of the weld pool position in space. The above disadvantages can be eliminated by providing the welding process energy parameters constant in time, or varying them by a certain program.

The length of just the Russian part of the main pipeline system built in the former Soviet Union for transportation of natural gas, oil and their processing products, is 208,000 km, with predominantly high-pressure and large diameter (1220–1420 mm) pipelines. Most of the main pipelines have been in operation for a rather long time: 30 % of gas pipelines have been in service for more than 20 years, and 15 % for about 30 years. Maintenance of the pipelines in the operable condition requires performance of selective scheduled repair of sections with critical defects, applying effective and versatile technologies which ensure restoration of the strength and fatigue life of a defective section of the pipeline to the level of the sound section, for instance, by the composite-coupling technology. In this case welding is the main technological operation responsible for the quality of repair. The currently used manual arc welding, especially for long couplings, leads to considerable time consumption, and, further more, the repair quality is affected by welders' skill.

Further progress in construction of the main pipelines ensuring higher rate of mounting and repair, lowering of the welding operations cost, while providing the required level of quality and service properties of the welded joints, is possible by way of introduction of high-efficient adaptive pulsed welding technologies and specialised equipment for their implementation. The process efficiency increases 5 to 6 times and the requirements to welder's skill are lowered.

Adaptive pulsed processes provide correction of the selected algorithm by feedback channels, depending on the condition of the controlled plant, namely the electrodynamic system of the power source-arc-weld pool-welded joint zone. The electric circuitry of the pulsed power supply systems is implemented by connection of additional modules to standard welding equipment. The optimal algorithms of control of the energy characteristics of the process ( $I(t)$ ,  $U_{\text{arc}}$ ,  $I_{\text{peak}}$ ,  $U_l$ ) developed by computer-aided design methods, permit conducting the technological process of single-sided pulsed-arc welding of the root welds with reverse bead formation without additional backing or backing run welding from the inside in  $\text{CO}_2$ , or with coated electrodes. The stability of such a welding process predetermines a stable quality of weld formation which depends on the time parameters of the process, namely short-circuiting frequency, arcing time in the pulse, time of the molten drop hanging at the electrode tip, drop size and uniformity of their

дуги в импульсе, продолжительность пребывания жидкой капли на электроде, размер капель, равномерность их переноса. Указанные параметры процесса могут быть оптимизированы на этапе технологической подготовки производства для получения бездефектного сварного соединения.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК МЕТЧИКОВ.** Б. Ф. Советченко, И. О. Хазанов, Н. А. Азаров (Политех. ун-т, г. Томск, РФ). Применение традиционной технологии сварки трением при изготовлении биметаллических заготовок метчиков из сталей марок Р6М5 и 45 приводит к значительному браку (до 30 %), который выявляется при ударном контроле после окончательной термической обработки метчиков. Брак связан с образованием в стыке блестящих колец скольжения, возникающих в результате выпадения сложных комплексных карбидов (хрома, молибдена и вольфрама) при температурах, равных  $0,8 T_{\text{пл}}$  свариваемого металла. Использование эффекта сверхпластичности быстрорежущей стали при сварке трением, который проявляется при температурах ниже таковых фазовых превращений, позволяет значительно улучшить качество сварных соединений. Повышение прочности и надежности сварного соединения достигается за счет образования благоприятной мелкой структуры в металле зоны соединения и отсутствия блестящих полос скольжения, являющихся концентраторами напряжений. Мелкая структура в зоне соединения образуется вследствие протекания в ней при определенной температуре в условиях пластического деформирования динамического наклепа с последующей динамической рекристаллизацией. В результате динамической рекристаллизации происходит значительное измельчение ферритного зерна в быстрорежущей стали и стали 45. Кроме того, в стали 45 осуществляется динамическая рекристаллизация и сфероидизация пластинчатого цемента в перлите, в результате чего образуется микроструктура зернистого перлита. Средний диаметр зерна легированного феррита в зоне термического влияния быстрорежущей стали Р6М5 и в стыке составляет 1,4...2,0 мкм, а со стороны стали 45 средний диаметр зерен феррита и перлита равен менее 2,5 мкм. При такой технологии сварки полностью исключается вероятность возникновения закалочных структур в зоне соединения, что позволяет отменить высокотемпературный отжиг заготовок метчиков после сварки. Предложенная технология сварки была реализована на машине типа И-228, снабженной аппаратурой управления сварочным циклом в зависимости от температуры нагрева зоны сварки. Производительность машины позволяет получать за час работы 140...180 биметаллических заготовок метчиков диаметром 17 мм при полном отсутствии брака.

**ВИКОРИСТАННЯ ДВОЕЛЕКТРОДНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПІД ФЛЮСОМ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ.** Б. П. Татарин, В. Ю. Мاستенко (Держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна). Використання дрютяних електродів при наплавленні з метою нанесення захисних покриттів (в тому числі антикорозійного, стійкого до спрацювання та інш.) значною мірою обмежене. Це пов'язано з низькою продуктивністю процесу і великою част-

transfer. This set of process parameters can be optimized at the stage of technological preparation of production, in order to produce a sound welded joint.

**APPLICATION OF SUPERPLASTICITY EFFECT OF HIGH-SPEED STEEL IN FRICTION WELDING OF BIMETAL BILLETS OF TAPS.** B.F. Sovetchenko, O.I. Khazanov, N.A. Azarov (Polytechnical University, Tomsk, Russia). The application of a traditional technology of friction welding in manufacture of bimetallic billets of taps of steels of R6M5 and 45 grades leads to a noticeable rejection (up to 30 %) which is revealed at an impact inspection after the final heat treatment of the taps. The rejection is made because of formation of glittering rings of slipping in the butt, which occur as a result of precipitation of complex carbides (chromium, molybdenum and tungsten) at temperature, equal to  $0.8 T_{\text{melt}}$  of the metal being welded.

The use of the superplasticity effect of the high-speed steel in friction welding, which is pronounced at temperatures lower than those of the phase transformations, can improve significantly the quality of the welded joints. The increase in strength and reliability of the welded joint is attained due to the formation of a favourable fine structure in metal of the joint zone and absence of glittering slip bands, being the stress raisers.

The fine structure in the joint zone is formed as a result of proceeding the dynamic cold working with a next dynamic recrystallization in this zone at a definite temperature under the conditions of a plastic deforming. The dynamic recrystallization results in a significant refining of a ferritic grain in the high-speed and 45 grade steel. In addition, the steel 45 is remarkable by a dynamic recrystallization and spheroidizing of a flaky cementite in a pearlite, thus resulting in the formation of a microstructure of a grained pearlite. A mean diameter of an alloyed ferrite grain in HAZ of the high-speed steel R6M5 and in the butt is 1.4-2.0  $\mu\text{m}$ , and from the side of steel 45 the mean diameter of grains of ferrite and pearlite is less than 2.5  $\mu\text{m}$ .

When this technology of welding is used, the probability of occurring hardening structures in the joint zone is excluded completely that makes it possible to eliminate the high-temperature annealing of tap billets after welding.

The offered technology of welding was realized in the I-228 type machine, which includes the equipment for control of welding cycles depending on the temperature of the welding zone heating. The machine productivity provides 140-180 bimetal taps of 17 mm diameter per hour at a complete absence of rejection.

**APPLICATION OF TWIN-ELECTRODE SUBMERGED-ARC SURFACING FOR IMPROVEMENT OF QUALITY OF WELDED STRUCTURES.** B.P. Tatarin, V.Yu. Mastenko (Ivan Pulyui State Technical University, Ternopil, Ukraine). Application of wire electrodes in surfacing to deposit the protective coatings (including anticorrosive, wear-resistant and other coatings) is limited to a certain extent. This is explained by a low efficiency of the process and a large share of the parent metal in the deposited metal, that in-

кою основного металу в наплавленому, що суттєво впливає на властивості наплавленого металу.

Для зменшення частки основного металу в наплавленому деякі дослідники пропонують два основних способи дводугового наплавлення. Перший полягає в наплавленні одним дрітним електродом, який підігрівается і подається в рідку зварювальну ванну, а другий — в наплавленні дугою побічної дії. Застосування цих способів, як правило, підвищує продуктивність процесу, але не забезпечує мінімально необхідне перемішування основного металу в наплавленому, окрім того, можливе неповне сплавлення наплавленого металу з основним. Все це не забезпечує необхідної якості захисних покриттів і суттєво обмежує їх використання в промисловості при виготовленні зварних конструкцій.

Зменшити частку основного металу в наплавленому в поєднанні з можливістю регулювання її в достатньо широких межах одночасно із забезпеченням високої продуктивності процесу можливо шляхом подачі в зону горіння дуги додаткового електродного дроту, підключеного до того ж полюса джерела живлення, що й основний метал. Додатковий електродний дріт подається в зону дуги як попереду зварювальної дуги в напрямку наплавлення (в головну частину зварювальної ванни), так і позаду (в хвостову її частину). Проведені експерименти показали, що при подачі додаткового електродного дроту в головну частину зварювальної ванни забезпечується краще формування наплавлених валиків порівняно з його подачею в хвостову частину. Так, при наплавленні електродними дротами діаметром 5 мм (основного і додаткового) під флюсом марки ФЦ-16 на сталь ВСтЗсп на режимі  $I_n = 600$  А,  $U_d = 30$  В,  $v_{дд} = 35$  м/год,  $v_n = 25$  м/год геометричні розміри валиків у першому варіанті складали: ширина — 24 мм, висота — 2,6 мм, глибина проплавлення — 3,5 мм, частка основного металу в наплавленому — 48 %, а в другому, — відповідно 20,0, 3,0, 6,5 мм та 60 %.

На основі експериментальних досліджень з подачею електродного дроту попереду зварювальної ванни встановлено, що на якість формування валиків дуже впливає місце та кут подачі додаткового електродного дроту і при підвищенні продуктивності в 1,5...2,0 рази можна досягти не лише регулювання геометричних розмірів в широких межах наплавленого валика, але і суттєво впливати на частку основного металу в наплавленому, яка змінювалася від 10 до 60 %, підвищити якість наплавленого металу і значно зменшити товщину захисного покриття при збереженні всіх необхідних властивостей.

**ЗАЩИТА КАТОДНОГО УЗЛА СВАРОЧНОЙ ПУШКИ ПРИ ЭЛС В НИЗКОМ ВАКУУМЕ.** В. О. Токарев, Е. Н. Румянцев (ФГУП НПО «Техномаш», г. Москва, РФ). Проблема защиты при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) элементов конструкции катодного узла от интенсивного воздействия заряженных частиц и паров металла, а также уменьшения дополнительных потерь энергии сварочного луча на трассе свариваемое изделие—сварочная пушка при снижении вакуума — крайне актуальна.

Использование сварочных пушек с дифференциальной откачкой и двойного преломления луча не во всех важных случаях обеспечивает эффективную защиту катода и уменьшение потерь удельной мощности сварочного луча при снижении вакуума.

fluence greatly the properties of the deposited metal. To reduce the share of the parent metal in the deposited metal, some researchers suggest two main methods of the twin-arc surfacing. The first method consists in surfacing with one wire electrode, which is preheated and fed to the liquid weld pool, while the second method consists in surfacing with an auxiliary arc. Application of these methods increases, as a rule, the efficiency of the process, but does not provide a minimum-required dilution of the parent metal in the deposited metal and, consequently, a partial fusion of the deposited metal with the parent metal is possible. All these drawbacks do not provide the required quality of the protective coatings and limit significantly the use of these methods in industry for the manufacture of welded structures.

The reduction in the share of the parent metal in the deposited metal in combination with a feasibility of its control within the wide ranges, that provides simultaneously the high efficiency of the process, is possible by feeding an auxiliary electrode wire into the zone of an arc burning. This wire is connected to the same pole of the power source as the parent metal. The auxiliary electrode wire is fed to the arc zone both ahead of the welding arc in the direction of melting (to the head part of the weld pool), and also behind the welding arc (to its tail part).

The experiments showed that during feeding the auxiliary electrode wire to the head part of the weld pool the better formation of the deposited beads is provided as compared with its feeding to the tail part. Thus, when surfacing with electrode wires of 5 mm diameter (main and auxiliary) using the flux of FTs-16 grade on steel BSt3 (killed) at the condition:  $I_s = 600$  А,  $U_{arc} = 30$  В,  $V_{a.w.f.} = 35$  м/г,  $V_s = 25$  м/г, the geometric sizes of beads in the first version were: width = 24 mm, height = 2.6 mm, depth of penetration — 3.5 mm, share of the parent metal in the deposited metal — 48 %, while in the second version they were 20.0, 3.0, 6.5 mm and 60 %, respectively.

It was established on the basis of experimental investigations with a feeding of the electrode wire ahead of the welding pool that the location and angle of feeding the auxiliary electrode wire influence greatly the quality of the formation of beads and at the increase of the efficiency 1.5–2.0 times it is possible to attain not only the control of geometric sizes within the wide ranges of the deposited bead, but also to influence the share of the parent metal in the deposited metal which varied from 10 to 60 %, to improve the quality of the deposited metal and to decrease significantly the thickness of the protective coating, preserving all necessary properties.

**PROTECTION OF A CATHODE UNIT OF WELDING GUN IN LOW-VACUUM EBW.** V.O. Tokarev, E.N. Rumyantsev (NPO «Tekhnomash», Moscow, Russia). The problems of protection of elements of a cathode unit during the electron beam welding (EBW) from the intensive action of charged particles and vapours of metal and also of a decrease in additional losses of energy of a welding beam in the route "workpiece to be welded — welding gun" during decrease in vacuum are rather actual.

The application of welding guns with differential evacuation and a double refraction of beam does not provide in all important cases the effective protection of the cathode and decrease in losses of a specific capacity of the welding beam during the decrease in vacuum.

Пространство над сварочной ванной заполнено смесью, состоящей из квазинейтральной холодной плазмы, «перемешанной» с парами металла. Составляющие этой смеси отличаются векторами скорости  $V_z$ , а их концентрация имеет пространственное распределение  $P$ , которое в первом приближении описывается законом  $\cos^n$ .

Изменение значения и направления векторов  $V_z$  или изменение пространственного распределения  $P$ , или одновременное изменение указанных параметров смеси дает возможность приблизиться к решению поставленной проблемы.

Указанные обстоятельства послужили основой для разработки и практической реализации устройства, обеспечивающего защиту катодного узла от паров металла и заряженных частиц при ЭЛС. Вылетающие из сварочной ванны пары металла и заряженные частицы попадают в зону действия устройства защиты (УЗ). Вектор скорости их движения изменяется по значению и направлению. Постепенно траектории их движения из преимущественно линейных становятся круговыми, а затем, по мере «углубления» в зону действия УЗ, — спиралеобразными. При движении по спиралеобразным траекториям формируются «сгустки» вещества, скорость которых в продольном (к катоду) направлении уменьшается. Это вызывает дополнительное осаждение паров металла на стенках УЗ и стимулирует процессы электронно-ионных взаимодействий.

Одновременно происходит сепарация заряженных частиц пропорционально их энергиям и массе с последующей частичной нейтрализацией и осаждением на стенках УЗ.

Применение устройства защиты обеспечивает попадание на катод лишь небольшого количества высокоэнергетичных заряженных частиц и снижение потерь мощности электронного сварочного луча на 18...20 % при прохождении его сквозь смесь, состоящую из паров металла и заряженных частиц, при давлении в сварочной камере 6,65 Па.

**СОСТАВ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ СВАРИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ОТ БРЫЗГ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ.** К. И. Томас, С. Б. Сапожков, В. Т. Федько (Филиал Том. политех. ун-та, г. Юрга, РФ). Одним из основных недостатков, способствующих снижению эффективности применения сварки в углекислом газе, является значительный угар и разбрызгивание электродного металла. Это увеличивает расход материалов и уменьшает производительность труда. Трудоемкость зачистки 1 пог. м шва от прилипших к изделию брызг составляет 30...40 % трудоемкости всего процесса сварки.

Для защиты поверхности свариваемых изделий от брызг при сварке в углекислом газе применяют различные составы защитных покрытий. На основании проведенных исследований защитных покрытий был сделан вывод, что наилучшие технологические свойства и наименьшее влияние на электрические, технологические и санитарно-гигиенические характеристики процесса сварки имеют покрытия на основе водного раствора сульфитно-спиртовой барды.

Авторами разработан следующий состав защитного покрытия, г: сульфитно-спиртовая барда — 40...50, кальцинированная сода — 30...40, декстрин —

Spacing over the weld pool is filled with a mixture, which consists of a quasi-neutral cold plasma mixed with metal vapours. Constituents of this mixture are characterized by vectors of rate  $V_z$  and their concentration has a spatial distribution  $P$  which is described by a law of  $\cos^n$  in the first approximation.

The change in value and direction of vectors  $V_z$  or change in the spatial distribution  $P$  or a simultaneous change in the mentioned parameters of the mixture gives a feasibility to come closer to the solution of the problem put forward.

The above-mentioned circumstances served a basis for the development and practical realization of the device which will provide the protection of the cathode unit from the metal vapours and charged particles during EBW. The metal vapours, evolved from the weld pool, and the charged particles enter the zone of action of the protection device (PD). The vector of their movement is changed in value and direction. The paths of their movement changed gradually from linear to circular ones mainly, and then on "deepening" to the zone of PD action they become spiral-shaped. During movement along the spiral-shaped paths the "clusters" of substance are formed whose rate in the longitudinal direction (to the cathode) is decreased. This causes the additional precipitation of metal vapours on the PD walls and stimulates the processes of electron-ion interaction.

Simultaneously, the separation of charged particles in proportion to their energy mass is occurred with a next partial neutralizing and precipitation at the PD walls.

Application of the protection device provides the minimum precipitation of high-energy charged particles at the cathode and reduces the losses in capacity of the electron welding beam by 18-20 % at its passing through the mixture which consists of metal vapours and charged particles at the 6.65 Pa pressure in the welding chamber.

**COMPOSITION OF COATING FOR PROTECTION OF SURFACE OF PRODUCTS FROM MOLTEN METAL SPATTERS IN CO<sub>2</sub> WELDING.** K.I. Tomas, S.B. Sapozhkov, V.T. Fedko (Division of the Tomsk Polytechnical University, Yurga, Russia). Among the main drawbacks, a noticeable smoke and electrode metal spattering can be outlined that contribute to a decrease in an effectiveness of using the CO<sub>2</sub> welding. This increases greatly the consumption of materials and decreases the labour productivity. The labor content for cleaning of 1 linear meter of weld from spatters, stuck to the workpiece, is 30-40 % of the labour content of the whole welding process.

To protect the surface of workpieces being welded from spatters during the CO<sub>2</sub> welding, the different compositions of protecting coatings are used. As a result of investigations of protective coatings, the conclusion has been made that the coatings on the base of a water solution of a sulphite-alcohol malt-residue have the best technological properties and the least effect on electric, technological and sanitary-hygienic characteristics of the welding process.

The authors have developed the following composition of the protective coating, g: sulphite-alcohol malt-residue 40-50; soda ash — 30-40; dextrin — 80-100; waste

80...100, отходы абразивного производства (термостойкий наполнитель) — 100...150 на 1 л воды. Исследования технологических свойств нового покрытия показали, что оно обеспечивает хорошую смачиваемость поверхности свариваемых изделий. Углы смачивания следующие: сталь в состоянии поставки —  $(42,4 \pm 5,7)^\circ$ ; пескоструйная поверхность —  $(45,7 \pm 6,3)^\circ$ ; шлифованная поверхность —  $(38,3 \pm 7,2)^\circ$ ; поверхность со смазкой —  $(19,2 \pm 4,8)^\circ$ . Исследование термостойкости нового покрытия показало, что оно отличается достаточной термостойкостью, препятствующей прилипанию брызг расплавленного металла к поверхности изделия в результате введения отходов абразивного производства в качестве термостойкого наполнителя. Теплота сгорания навески уголь + новое покрытие равна 25,549 МДж/кг.

Разработанный состав защитного покрытия не оказывает существенного влияния на стабильность процесса сварки. Потери металла на угар и разбрызгивание при сварке с новым покрытием составляют 22...27 %.

Установлено, что разработанный состав защитного покрытия при сварке выделяет вредных веществ гораздо меньше, чем предусмотрено предельно допустимыми нормами во всем диапазоне режимов сварки.

Новое покрытие легко наносится на поверхность свариваемых изделий, не осыпается при транспортировке и легко удаляется после сварки металлической щеткой.

Компоненты, входящие в состав разработанного покрытия, не дефицитны и имеют небольшую стоимость. Технология приготовления нового покрытия проста, не требует специальных навыков и дорогих устройств.

**РАЗРАБОТКА ДВУХЭЛЕКТРОДНОЙ СВАРКИ TIG С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ РАСПЛАВЛЕННОЙ ВАННОЙ.** Ю. Фуджита (Свароч. техн. о-во, г. Токио, Япония), Ю. Манабе, С. Зенитани, С. Уракава (Фирма «Mitsubishi Heavy Industries», г. Хиросима/Токио, Япония). В горизонтальном положении под влиянием сил гравитации сварочный валик отклоняется, становясь висющим. Эта проблема создает трудности при выполнении горизонтальной сварки с высокой скоростью наплавки. Для ее разрешения авторы предлагают концепцию сварочного процесса с электромагнитным управлением расплавленной ванной, при котором при помощи направленной вверх электромагнитной силы контролируются поток расплавленного металла и форма валика.

Предлагается рассмотрение двухэлектродной сварки TIG с электромагнитным управлением расплавленной ванной. Два устройства подачи проволоки подключаются последовательно к источнику нагрева, при этом одна проволока вставляется перед дугой, а вторая — за дугой. Нагревающий проволоку ток протекает в сварочную ванну между проволоками, и магнитное поле, пересекающее под прямым углом поток тока, наводится на расплавленную ванну. Направленная вверх сила, создаваемая в расплавленной ванне, улучшает форму валика шва. Ток нагрева проволоки повышает скорость наплавки в результате нагрева Джоулевым теплом.

of abrasive operation (thermo-resistant filler) — 100–150 per liter of water.

The study of technological properties of the new coating showed that it provides a good wettability of the surface of workpieces being welded. The angles of wetting with a new coating are as follows: as-delivered steel  $(42.4 \pm 5.7)^\circ$ ; sand-blasted surface  $(45.7 \pm 6.3)^\circ$ ; surface after grinding  $(38.3 \pm 7.2)^\circ$ ; surface with a grease  $(19.2 \pm 4.8)^\circ$ . The examination of heat resistance of the new coating showed that it is characterized by a sufficient heat resistance that prevents sticking of spatters of the molten metal to the workpiece surface, if to add the waste of an abrasive operation as a heat-resistant filler. The heat of combustion of a coal + new coating sample is 25.549 MJ/kg.

The developed composition of the protective coating does not influence greatly the welding process stability. Metal losses for a smoke and spattering in welding using the new coating is 22–27 %.

It was established that the developed composition of the protective coating evolve much less harmful substances than it is envisaged by admissible limits within the whole range of the welding conditions.

The new coating is deposited easily on the surface of workpieces to be welded. It does not discharge during transportation and is easily removed after welding with a metallic brush.

Components, included into the composition of this coating, are not sparse and expensive. Technology of preparation of the new coating is simple and does not require a special skill and expensive devices.

**DEVELOPMENT OF 2 WIRES TIG WELDING WITH ELECTROMAGNETICALLY CONTROLLED MOLTEN POOL PROCESS.** Y. Fujita, Yu. Manabe, S. Zenitani, S. Urakawa (JWES, Tokyo, Japan, Mitsubishi Heavy Industries, Hiroshima/Tokyo, Japan). In horizontal position, due to gravity, the weld bead is deviated and becomes suspended. This problem causes difficulties in horizontal welding at a high rate of deposition. For its solution the authors suggest the conception of the welding process with an electromagnetic control of the molten pool, during which the flow of the molten metal and bead shape are controlled with the upward electromagnetic force.

Two-wire TIG welding with an electromagnetic control of the molten pool is considered. Two-wire feeding units are connected in series to the heat source. Here, one wire is fed in front of the arc, while the second wire is fed at the rear of the arc. Current, which heats the wire, is passed to the weld between the wire, and the magnetic field, which crosses the current flow at a right angle, is induced to the molten pool. The upward force, generated inside the molten pool, improves the weld bead surface. The wire heating current increases the rate of deposition as a result of Joule heating.

During tests the welding process was stable at high rates of deposition (100–150 g/min). Bead shape was significantly improved in proportion to the magnetic induction. Weld with V-shaped edge preparation was made on stainless clad steel at high rates of deposition

В ходе испытаний процесс сварки был стабильным с высокими скоростями наплавки (100...150 г/мин). Форма валика значительно улучшена пропорционально магнитной индукции. Сварной шов с V-образной разделкой кромок выполняли на нержавеющей плакированной стали и при высоких скоростях наплавки ( $\approx 100$  г/мин). Были получены хорошее проплавление, гладкий валик и качественное сварное соединение. После этих испытаний сварочный процесс с электромагнитным управлением расплавленной ванны нашел применение при изготовлении крупногабаритных конструкций. Целесообразность процесса была подтверждена успешным использованием в промышленности.

#### ПАЙКА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУГОВОГО НАГРЕВА. В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова, И. В. Зволинский, М. С. Самохин (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).

Основным способом ремонта лопаток газотурбинных двигателей после литья или выработки определенного ресурса является пайка в вакуумной печи (обычно с радиационным нагревом всей детали) — сложный, дорогой и малопроизводительный процесс. Более привлекательным в этом отношении является дуговой нагрев неплавящимся электродом в инертном газе с локальной или общей защитой нагреваемого участка. Как известно, дуговая сварка высоколегированных никелевых сплавов (с большим количеством  $\gamma$ -фазы) не достигла значительных успехов. Попытки использовать в качестве присадки припой с традиционными депрессантами также не принесли положительных результатов. Авторами исследована возможность применения для этих целей никелевых припоев, где в качестве депрессантов применялись элементы IV группы Периодической системы (Zr, Hf, Ti и др.).

Эти припои при капиллярной вакуумной пайке никелевых сплавов обеспечивают получение соединений с жаропрочностью, близкой к таковой основного металла. Также хорошо они зарекомендовали себя при ремонте элементов газотурбинных двигателей с использованием дугового нагрева в вакууме и светолучевого нагрева в аргоне. Состав припоев был выбран с учетом условий аргонно-дугового нагрева. Эксперименты по ремонтной пайке искусственно созданных и реальных технологических дефектов на лопатках авиационных и судовых газотурбинных двигателей из сплавов ЖС-6У, ЧС-70, ЧС-88 и IN-738 LC (количество  $\gamma$ -фазы 35...60 %) осуществляли на воздухе с использованием аргоно-дугового нагрева. В качестве присадочного металла выбраны литые прутки никелевых припоев диаметром 3 мм, депрессантами в них были Ti, Zr или Hf. Изучали возможность использования композиционных припоев, в которых в качестве высокотемпературной фазы использовали порошки жаропрочных никелевых сплавов.

В ходе экспериментов по дуговой пайке жаропрочных сплавов исследовали влияние на трещиностойкость тока (40...260 А), температуры предварительного подогрева (100...600 °С), толщины металла лопатки на участке ремонта (2,5...40 мм), формы и размеров дефекта (поверхностные углубления диаметром 5...25 мм, глубиной 5...10 мм, сквозные

(100 г/мин, приблизительно). A good penetration, smooth bead and quality welded joint were obtained. After these tests the welding process with an electromagnetic control began to be used in manufacture of large-sized structures. The advantages of the process were confirmed by its successful application in industry.

#### BRAZING OF HIGH-ALLOYED NICKEL ALLOYS USING ARC HEATING. V.F.Khorunov, S.V.Maksimova, I.V.Zvolinsky, M.S.Samokhin (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).

The main method of repair of the gas turbine engine blades after casting or definite service life is brazing in a vacuum furnace (usually with a radiation heating of the whole component) which is a complicated, expensive and low-efficient process. The arc heating with a non-consumable electrode in inert gas with a local or common protection of the region to be heated is more attractive in this respect.

As is known, the arc welding of high-alloyed nickel alloys (with a large amount of  $\gamma$ -phase) did not attain great achievements. Attempts of using brazing alloys with traditional depressants as fillers did not give the positive results either. The authors have investigated the feasibility of application of nickel brazing alloys for these purposes, where the elements of IV group of the Periodic System (Zr, Hf, Ti, etc.) were used as depressants.

These brazing alloys in a capillary vacuum brazing of nickel alloys provide the joint with a heat resistance close to that of the parent metal. They also gave good results in the repair of elements of gas turbine engines using the arc heating in vacuum or light-beam heating in argon. Composition of brazing alloys was selected taking into account the argon-arc heating conditions.

Experiments on repair brazing of artificially created and real technological defects on blades of aircraft and ship gas turbine engines of alloys ZhS-6U, ChS-70, ChS-88 and IN-738LC (amount of  $\gamma$ -phase is 35-60 %) were performed in air using argon-arc heating. 3 mm diameter cast rods of nickel brazing alloys were selected as a filler metal and Ti, Zr and Hf were depressants. The feasibility of using composite brazing alloys, in which the powders of heat-resistant alloys were used as a high-temperature phase, was studied.

In the course of experiments on arc brazing of heat-resistant alloys, the effect of current (40-260 A), temperature of preheating (100-600°C), thickness of blade metal at the repair area (2.5-40 mm), shape and sizes of a defect (surface dents of 5-25 mm diameter, 5-10 mm depth, through cavities of 5-12 mm diameter), preliminary and post repair heat treatment (austenitization, ageing) on crack resistance was investigated. For comparison the surfacing with welding wire of EI 683 alloy was also performed.

It was established that the eutectic nickel-based brazing alloys in a pure form or with an addition of heat-resistant alloys provide higher resistance against cracks, as compared with a reference alloy EI 683.

свищи диаметром 5...12 мм), предварительной и послеремонтной термообработки (аустенизация, старение). Для сравнения выполняли также наплавку сварочной проволокой из сплава ЭИ683.

Установлено, что эвтектические припои на основе никеля в чистом виде или с добавкой жаропрочных сплавов обеспечивают более высокую стойкость против трещин, по сравнению с контрольным сплавом ЭИ683.

Определены оптимальные припойные композиции на основе никеля, способствующие формированию металла ремонтных участков лопаток без трещин в металле шва и зоны термического влияния, в том числе и после наплавки без подогрева на всех исследованных лопаточных сплавах. Наплавленный металл имеет мелкозернистое дендритное строение. На границе соединения зафиксировано проникновение эвтектики по границам зерен основного металла на глубину 5...10 мкм, а в отдельных случаях — до 40 мкм. Температурные процессы при наплавке не оказывают существенного влияния на рост зерна основного металла. Нет существенной разницы между микротвердостью основного металла зоны сплавления и металла наплавки. Например, при ремонтной наплавке на сплав ЧС-70 опытным припоем микротвердость основного металла, металла зоны сплавления и металла наплавки составила соответственно 3210, 2860 и 3210 МПа.

Швы, полученные с использованием предлагаемого способа, хорошо совместимы с защитными покрытиями и допускают вторичную термообработку изделия без появления трещин и других дефектов в ремонтируемом участке.

Исследована также химическая неоднородность соединений после пайки и термообработки. Результаты исследований позволяют сделать вывод о перспективности этого направления, особенно в сочетании с композиционными припоями.

#### ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ АЛЮМИНИЯ СО СТАЛЬЮ.

*В. Ф. Хорунгов, О. М. Сабаш, В. С. Кучук-Яценко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина).* Соединение разнородных металлов, например, алюминия со сталью, дает возможность получать изделия с новыми характеристиками, недоступными при соединении однородных металлов. Существующие способы сварки (взрывом, магнитно-импульсная, трением, диффузионная) могут способствовать предотвращению образования хрупких интерметаллидных слоев в зоне соединения разнородных металлов. При высокотемпературной пайке также не удается избежать образования хрупких интерметаллидных прослоек, однако в этом случае имеется больше возможностей воздействовать на строение и прочность паяных швов путем варьирования температурно-временных параметров и составов припойных материалов. Естественно, технология пайки алюминия со сталью не может быть универсальной. Эту проблему нужно решать для конкретных изделий. Так, создана технология пайки биметаллической посуды из коррозионно-стойкой стали с алюминием. Авторы решили конкретную задачу — разработку технологии пайки переходников из многослойного пакета алюминия с низкоуглеродистой сталью, которые можно использовать для изготовления электродов электролиза алюминия.

The optimum nickel-based brazing alloy compositions which help to form the metal of the blade repair areas without cracks in weld metal and HAZ, including that after surfacing without preheating on all the investigated blade alloys were established. The deposited metal has a fine-grained dendritic structure. At the boundary of the joint the penetration of eutectics at the boundaries of grains of the parent metal for 5–10  $\mu\text{m}$  depth, and in separate cases up to 40  $\mu\text{m}$ , was observed. The temperature processes in surfacing do not influence greatly the growth of the parent metal grain. There is no noticeable difference between the microhardness of the parent metal of the fusion zone and the surfacing metal. For example, in repair surfacing on alloy ChS-70 using an experimental brazing alloy the microhardness of the parent metal, fusion zone and surfacing metal was 3210, 2860 and 3210 MPa, respectively.

Welds produced with the offered method are well correlated with protective coatings and admit the secondary heat treatment of the product without initiation of cracks and other defects in the repair area.

Chemical heterogeneity of joints after brazing and heat treatment were also investigated. The investigation results show that this trend is promising, especially in combination with composite brazing alloys.

#### TECHNOLOGY OF ALUMINIUM-STEEL BRAZING.

*V.F.Khorunov, O.M.Sabadash, V.S.Kuchuk-Yatsenko (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine).* The joining of dissimilar metals, for example, aluminium with steel, makes it possible to obtain products with new characteristics, which cannot be provided in joining similar metals. Existing methods of welding (explosion, magnetic-impulse, friction, diffusion) can promote the prevention of the formation of brittle intermetallic layers in the zone of joining the dissimilar metals. During the high-temperature brazing it is also impossible to prevent the formation of brittle intermetallic layers. However, in this case there are large opportunities to influence the structure and strength of brazed joints by varying temperature-time parameters and compositions of brazing materials. Naturally, the technology of aluminium-steel brazing cannot be versatile. This problem should be solved for specific products. Thus, the technology of brazing the bimetal utensils from corrosion-resistant steel with aluminium has been developed. The present work was aimed at the solution of a specific problem: to develop the technology of brazing transition pieces from a multilayer pack of aluminium with low-carbon steel, which can be used for manufacture of electrodes for aluminium electrolysis.

In experiments the aluminium of AD1 grade (99.7 % Al), low-carbon steel St.3, fluoride flux FAF540 developed

В экспериментах использовали алюминий марки АД1 (99,7 % Al), низкоуглеродистую сталь СтЗ, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона фторидный флюс ФАФ540 и паяльные прутки ПАК 12 П. Припой образовывался в процессе пайки за счет выделения кремния из флюса и взаимодействия его с алюминием. Для пайки макетных образцов готовили стальные бруски поперечным сечением 60×60 мм и пакеты пластин из алюминия (толщиной 1 мм) сечением 17×60 мм. Пайку сталеалюминиевых макетных образцов осуществляли на воздухе с использованием индукционного нагрева.

Паяные соединения алюминия со сталью исследовали металлографическими методами и испытывали на прочность. Микроструктуру паяных швов изучали на шлифах после травления при помощи сканирующего электронного микроскопа. Прочность паяных стандартных образцов определяли при кратковременных испытаниях на разрыв до и после термоциклирования. Термоциклирование образцов осуществляли по двум режимам: А — нагрев до фиксированной температуры 200, 300, 400, 500 °С и охлаждение погружением в воду с температурой 20 °С (50 циклов); Б — нагрев до температуры 200 °С и охлаждение в воде после 50, 100, 300, 500 циклов. Паяные соединения как стандартного, так и макетного образцов по своему строению и составу неоднородны, включают сталь, диффузионную зону, литой шов. Отличие микроструктуры соединений заключается в ширине диффузионных зон (для стандартного образца — около 10 мкм; для макетного — около 30 мкм) и морфологии контактных границ со сталью, что объясняется различными температурно-временными условиями пайки. Диффузионные зоны: интерметаллидная прослойка со стороны стали, предположительно, представляет собой фазу на основе соединения  $FeAl_3$ ; со стороны алюминия обнаружен слой, содержащий около 1 % железа. Паяный шов представляет собой алюминиево-кремниевый сплав переменного состава с 6...8 % Si. Прочность паяных соединений превышает исходную на 7...10 % после термоциклирования по режиму А и на 6 % меньше после термоциклирования по режиму Б. Изменение прочности паяных соединений зависит от увеличения интерметаллидной прослойки в результате воздействия температуры при термоциклировании.

На основании проведенных исследований была предложена новая конструкция переходного элемента сталеалюминиевого электрода. Разработан и опробован на макетных образцах способ флюсовой пайки на воздухе с использованием индукционного нагрева. Перед пайкой алюминиевый пакет «замораживался» (на алюминиевые пластины наносили флюс и затем паяли. Пайку макетов сталеалюминиевых электродов осуществляли при температуре 600...610 °С в течение 10 мин. В качестве паяльных материалов использовали фторидный флюс ФАФ540 и паяльные прутки ПАК 12 П. Флюс наносили на паяемые поверхности перед пайкой, а припой вводили в процессе пайки.

by the Paton Institute and brazing rods PAK12P were used. The brazing alloy was formed during the brazing process due to silicon precipitation from flux and its interaction with aluminium. For brazing the mock-ups, the steel bars of 60×60 mm transverse section and pack of 1 mm thick aluminium plates of 17×60 mm section were prepared. The brazing of steel-aluminium mock-ups was performed in air using an induction heating.

The brazed joints of aluminium with steel were examined using the metallographic methods and subjected to strength test. Microstructure of brazed joints was examined on as-etched sections with the help of a scanning electron microscope. Strength of brazed standard specimens was determined at short-time tensile tests before and after thermocycling. Thermocycling of specimens was realized using two conditions: A. Heating to a fixed temperature 200, 300, 400, 500 °C and cooling by immersion into the water of 20 °C temperature (50 cycles); B. Heating to temperature 200 °C and water cooling after 50, 100, 300, 500 cycles.

As to their structure and composition the brazed joints of both standard and mock-up samples are not homogeneous. They include steel, diffusion zone and a cast weld. Microstructures of the joints differ in width of the diffusion zone (for standard sample it is about 10  $\mu$ m, while for mock-up — about 30  $\mu$ m) and morphology of contact boundaries with steel that is explained by different temperature-time conditions of brazing. The diffusion zones, i.e. intermetallic interlayer from the side of steel is assumed to be a phase on the basis of  $FeAl_3$  compound, and from the side of aluminium a layer containing about 1 % Fe is observed. The brazed joint is an aluminium-silicon alloy of a variable composition with 6–8 % Si. The strength of the brazed joints exceeds the initial strength by 7–10 % after thermocycling using conditions A and it is lower by 6 % after thermocycling using condition B. The variation of strength of the brazed joints depends on increasing the intermetallic layer as a result of temperature effect during thermocycling.

A new design of a transition element of a steel-aluminium electrode has been suggested on the basis of the investigations. The method of a flux brazing in air using induction heating has been developed and tested on mock-up samples. Before brazing the aluminium pack was made "monolithic" (the aluminium plates were covered with a flux and then brazed). The brazing of mock-ups of steel-aluminium electrodes was realized at temperature 600–610 °C during 10 min. The fluoride flux FAF540 and brazing rods PAK12P were used as brazing materials. The flux was placed on the surfaces to be brazed before brazing and the brazing alloy was introduced during the process of brazing.

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГИ.** В. А. Цыганов, С. П. Рагунович, С. П. Торпачев (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). В НИКТИ СП с ОП разработан способ управления процессом электродуговой сварки, в котором вследствие учета отклонений статистических параметров режима от эталонных и детерминистического задания сигнала мощности дуги в процессе электродуговой сварки на основе трех статистических моментов и частоты пульсаций происходит точное регулирование статистического поля мощности дуги, сопровождающееся повышением стабильности горения дуги, уменьшением разбрызгивания металла, дефектов сварного шва.

Для управления процессом используется плата многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADC-200K/12-4. Основой платы являются микросхемы АЦП AD 7892 фирмы ANALOG DEVICES со встроенными устройствами выборки и хранения (УВХ). Плата имеет буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), что позволяет накапливать массив данных без участия программы. При этом частота выборок может превышать максимально возможную частоту обращений к устройству ввода/вывода. Максимальный объем массива — 16 тыс. точек для каждого канала. Для формирования сетки частот используется интегральный программируемый таймер типа 82C54. Канал 0 таймера служит для формирования частоты выборок, канал 1 — для формирования необходимого количества выборок, канал 2 — для формирования задержки запуска. Каналы 0 и 2 таймера тактируются частотой 14,318 МГц, деленной на два. При этом точность задания периода выборок составляет приблизительно 140 нс. Минимально допустимый период выборок — 5 мкс. Для ускорения чтения данных из ОЗУ используется автоматический инкремент адреса. По готовности массива данных вырабатывается прерывание, что позволяет свести к минимуму потери времени. Аналоговая часть платы содержит программный усилитель PGA. Значение коэффициента усиления может задаваться в пределах от 1 до 100. Для вывода управляющего сигнала плата имеет два канала 12-битных цифро-аналоговых устройств (ЦАП), в качестве которых применены микросхемы типа AD7945 фирмы ANALOG DEVICES. Регистры ЦАП находятся на адресном пространстве устройств ввода-вывода. Время установления выходного напряжения ЦАП — около 1 мкс. Базовый адрес платы полностью задается с помощью DIP-переключателя, что позволяет избежать конфликтов с другими платами.

Используя разработанный способ управления процессом дуговой сварки и плату ADC-200K/12-4, можно осуществлять регулирование практически любых технологических процессов электродуговой сварки, даже таких нестационарных, как сварка с попеременной подачей защитных газов, на импульсном и двуимпульсном токах, с импульсной подачей проволоки и др.

**CONTROL OF PROCESSES OF ARC WELDING SHEET STRUCTURES ON THE BASIS OF ARC DYNAMIC CHARACTERISTICS.** V.A. Tsyganov, S.P. Ragunovich, S.P. Torpachev (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus). This Institute has developed a method of control of the process of the electric arc welding, in which a precise control of a statistic field of arc power, accompanied by increase in stability of arc burning, decrease in metal spattering and defects of weld occurs due to taking into account the deviations of statistic parameters of conditions from reference and determining setting of the arc power signal during the electric arc welding process.

To control the process, a board of a multichannel analog-digital converter (ADC) ADC-200K/12-4 is used. The board is based on microcircuits ADC AD 7892 of ANALOG DEVICES Company with a built-in sampling and storage device (SSD). The board has a buffer core memory (BCM) that makes it possible to accumulate the data bank without using the program. Here, the frequency of samplings can exceed the maximum possible frequency applied to the device (input-output). The maximum volume of the data bank is 16 000 points for each channel. To form the net of frequencies an integral programming timer of the 82C54 type is used. Channel 0 of the timer serves for formation of the sampling frequency, channel 1 — for formation of a required amount of samplings and channel 2 — for formation of a start delay. Channels 0 and 2 are timed by frequency 14.318 MHz, divided in two. In addition, the accuracy of presetting the period of samplings is approximately 140 ns. The minimum allowable period of samplings is 5  $\mu$ s. To accelerate the data reading from the core memory an automatic increment of address is used. When the data bank is ready an interruption is operated, thus reducing the time losses to minimum. The analog part of the board includes a programming amplifier (PGA). The value of the coefficient of amplifying can be preset within the ranges from 1 to 100. For controlling signal output, the board has two channels of 12-bit digital-analog device (DAD), based on microcircuits of AD7945 type of ANALOG DEVICES Company. Registers of DAD are located in address spacing of input-output devices. The time of setting the output voltage of DAD is about 1  $\mu$ s. The base address of the board is preset with the help of DIP-switch, thus preventing conflicts with other boards.

With the use of the developed method of arc welding control and the board ADC-200K/12-4 it is possible to realize the control of almost any technological processes of electric arc welding, even such non-stationary processes as welding with an alternating feeding of shielding gases, at pulsed and two-pulsed currents, with a pulsed feeding of wire, etc.

# СТАБИЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА В ПОЛЕ УЛЬТРАЗВУКА. В. А. Цыганов, А. Г. Тимонович (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь).

При ультразвуковом воздействии на сварочную ванну в процессе кристаллизации большое влияние на микроструктуру материала сварного соединения оказывают два явления, непосредственной причиной которых является кавитационный эффект: дегазация расплава и диспергирование центров кристаллизации в поле ультразвука.

Показано, что в ультразвуковом поле пульсации температуры и давления повышают вероятность образования жизнеспособных зародышей газовой фазы. Возникшие пузырьки на начальном этапе дегазации быстро укрупняются в результате диффузии растворенного в расплаве газа внутрь пузырьков, а также за счет коалесценции с соседними пузырьками.

Ультразвуковая обработка жидкого металла оказывает ускоряющее влияние на окончательный этап процесса ультразвуковой дегазации под действием двух факторов. Во-первых, в поле ультразвуковой волны не слишком большой частоты (примерно 16...20 кГц) происходит объединение нескольких пузырьков благодаря гидродинамическим и акустическим течениям. Во-вторых, при колебательном движении жидкости подвижность пузырьков, находящихся в условиях ускорения, возрастает в несколько раз из-за большой разницы в плотности газа и жидкости, что способствует более быстрому всплытию пузырьков на поверхность. Этот факт известен в литературе как кажущееся снижение вязкости жидкости.

Ультразвуковое диспергирование и сопряженное с ним явление активации примесей расплава также имеет место при наложении ультразвукового поля на сварочную ванну в процессе ее кристаллизации. Вводимые в кристаллизующийся расплав ультразвуковые колебания изменяют условия протекания процессов зарождения и роста кристаллов. В общем случае при кристаллизации с наличием кавитации необходимо учитывать действие ультразвука на жидкую фазу (расплав), содержащую газовые пузырьки, а также на фронт кристаллизации и переходную (твердо-жидкую) область.

В качестве определяющих характеристик ультразвукового поля, влияющих на условия протекания процесса зарождения и роста кристаллов, рассмотрены интенсивность и длина волны ультразвука. На примере расплава железа было показано, что по мере роста интенсивности и снижения длины волны ультразвукового излучения происходит уменьшение размеров дендритной ячейки при кристаллизации расплава по двум основным причинам. Во-первых, размеры игольчатых структур на фронте кристаллизации ограничены при определенных значениях интенсивности и длины волны ультразвука. Во-вторых, возникновение пульсирующих кавитационных пузырьков, лавинообразное увеличение их концентрации в ультразвуковом поле с последующим «схлопыванием» создают условия повышенной активации примесей и диспергирования кристаллов в жидкой и твердо-жидкой областях, причем оба последних фактора способствуют увеличению скорости зарождения и концентрации центров кристаллизации. С

## STABILIZING OF MICROSTRUCTURE OF JOINTS IN FUSION WELDING WITH CAVITATION EFFECT IN THE FIELD OF ULTRASOUND. V.A.Tsyganov, A.G.Timonovich (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus).

With ultrasonic action on the weld pool during solidification two phenomena, caused by a cavitation effect, influence greatly the microstructure of the welded joint material, namely: degassing of melt and dispersion of centres of solidification in the field of ultrasound.

It is shown that in the ultrasonic field the pulsations of temperature and pressure increase the probability of formation of viable nuclei of the gas phase. The bubbles appeared at the initial stage of degassing are quickly enlarged as a result of diffusion of gas dissolved in melt, inside the bubbles, and also at the expense of coalescence with neighbouring bubbles.

The ultrasonic treatment of the molten metal has an accelerating effect on a final stage of the process of an ultrasonic degassing under the action of two factors. Firstly, in the field of an ultrasonic wave of not too high frequency (approximately 16-20 kHz) several bubbles are united due to hydrodynamic and acoustic flows. Secondly, at oscillating motion of the liquid the mobility of bubbles, being in an accelerated condition, increases several times due to a large difference in density of a gas and a liquid that contributes to a faster escape of the bubbles to the surface. This fact is known in the literature as the apparent decrease in liquid viscosity. The ultrasonic dispersion and, associated with it, phenomenon of activation of melt impurities takes places during superposition of the ultrasonic field on the weld pool in the process of its solidification.

Ultrasonic oscillations induced to the solidifying melt change the conditions of proceeding the processes of nucleation and growth of crystals. In a general case, during solidification with a presence of cavitation, it is necessary to take into account the action of the ultrasound on the liquid phase (melt), which contains gas bubbles, and also on the front of solidification and transition (solid-liquid) region.

Intensity and length of the ultrasound wave are considered the decisive characteristics of the ultrasonic field which influence the conditions of proceeding the processes of nucleation and growth of crystals. It was shown by an example of the iron melt that with a growth of intensity and decrease in wavelength of the ultrasonic radiation the sizes of a dendritic cell are decreased in melt solidification because of two reasons.

Firstly, the sizes of acicular structures at the front of solidification are limited by certain values of intensity and ultrasound wavelength.

Secondly, the occurrence of pulsating cavitation bubbles, avalanche-like increase in their concentration in the ultrasonic field with a subsequent "flopping" creates the conditions of an increased activation of impurities and dispersion of crystals in liquid and solid-liquid regions, the latter two factors increase the rate of nucleation and concentration of solidification centres. With a growth of concentration of small gas bubbles the intensity of action of powerful cumulative shock waves, occurring in "flopping" of bubbles and having a local nature, on the microstructure of the welded joint material is increased. Thus, the conclusion was made that the cavitation effect, intensified by the ultrasonic action on

ростом концентрации мелких газовых пузырьков возрастает интенсивность воздействия на микроструктуру материала сварного соединения мощных кумулятивных ударных волн, возникающих при «схлопывании» пузырьков и имеющих локальный характер. Таким образом, был сделан вывод о том, что кавитационный эффект, усиливаемый ультразвуковым воздействием на сварочную ванну, создает условия для объемной кристаллизации и измельчения зерна, что в свою очередь стабилизирует при соответствующих определенных значениях интенсивности и длины волны ультразвука микроструктуру сварного соединения, его прочностные свойства.

**ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОШЕННЫХ ТРАМВАЙНЫХ РЕЛЬСОВ.** Я. П. Черняк (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Трамвайные рельсы и колеса, работающие в паре, изнашивают друг друга. Наиболее интенсивно это происходит на криволинейных участках пути, где обычно устанавливаются желобчатые рельсы. Изнашиваются в основном внутренние боковые поверхности головки и губы рельса.

Замена изношенных рельсов новыми — дорогостоящая операция, прежде всего из-за их значительной металлоемкости и стоимости. Еще большие убытки городское хозяйство несет из-за необходимости разрушения и последующего восстановления дорожного покрытия, прекращения движения транспорта в процессе замены изношенных рельсов новыми. Желобчатые рельсы изготавливают в основном из сталей марок М-75 и М-76, содержащих до 0,82 % углерода. При дуговой наплавке боковой поверхности рельса плавящимся электродом содержание углерода в первом наплавленном слое может достигать 0,45 %. Чтобы при таком его количестве избежать образования трещин, наплавку проволоками феррито-перлитного класса обычно выполняют с предварительным подогревом до 350...400 °C и замедленным охлаждением. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология восстановительной наплавки рельсов, не требующая предварительного подогрева, что стало возможным благодаря созданию экономно-легированной порошковой проволоки аустенитного класса марки ПП-НП-ГХМ.

По данным ГКП «Киевэлектротранс», средняя стоимость одной замены рельсов на однопутной кривой протяженностью 50 м составляет 7000 дол. США. Расходы на наплавку этой кривой, предположительно, не должны превысить 2000 дол. Для реализации технологии восстановления рельсов на действующей трамвайной колее в НИЦ «Дуга-2» в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины спроектирован и изготовлен наплавочный аппарат УД-654. Он выполнен в виде самоходной тележки, передвигающейся по наплавляемому рельсу с рабочей и маршевой скоростями. На тележке размещены исполнительные механизмы, пульт управления, запас проволоки и флюса. Питание сварочной цепи осуществляется при помощи дизель-генератора. В случае необходимости два обрешеченных колеса, расположенных поперек рельсов, позволяют вручную оперативно вывести аппарат за пределы колеи. Чтобы не мешать трамвайному движению, наплавку следует производить в ночное время. Работы выполняют при сухой погоде и температуре не ниже 10 °C.

В трамвайном депо им. Шевченко (г. Киев) была проведена опытно-промышленная проверка разра-

боты, создает условия для объема солидификации и зерна refining, что в свою очередь стабилизирует микроструктуру сварного соединения и его свойства при определенных значениях интенсивности и длины волны ультразвука.

**RESTORATION SURFACING OF WORN-OUT TRAM RAILS.** Ya.P.Chernyak (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). The tram rails and wheels, which operate in a pair, are subjected to wear. The most intensive wear occurs at the curvilinear regions of the track where the channelled rails are mounted. The inner lateral surfaces of a head and lips of the rail are worn-out.

Replacement of the worn-out rails by the new rails is an expensive operation, first of all, because of their large metal content and cost. Municipality bears larger losses due to the necessity to destroy and then restore road covering and interrupt traffic during replacement of worn-out rails.

The channelled rails are manufactured mainly from steels of M-75 and M-76 grades, which contain up to 0.82 % carbon. In consumable-electrode arc surfacing of the lateral surface of the rail the carbon content in the first deposited layer can reach 0.45 %. To avoid cracking at such its content, the surfacing with wires of a ferritic-pearlitic class is usually performed using preheating up to 350–400 °C and delayed cooling.

The E.O.Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine has developed surfacing of rails without preheating owing to creation of a sparsely-alloyed flux-cored wire of the austenitic class (PP-NP-GKhM grade).

According to the data of "Kieλεκтротранс" the average cost of one replacement of rails at a single-track curve of 50 m length is 7000 US dollars, while the expenses for surfacing this curve are expected not to exceed 2000 US dollars.

To realize the technology of restoration of rails at the operating tram track, the Research Center "Arc" at the Paton Institute has designed and manufactured the UD-654 type machine. It is made in the form of a self-propelled carriage which is moved along the rail to be surfaced with operating and travel speeds. Executive mechanisms, control panel, spare wire and flux are located on the carriage.

The welding circuit is supplied from a diesel-generator. When necessary, two rubberized wheels located across the rails help to remove the machine quickly from the track. Surfacing should be made at night, not to interrupt the tram traffic. The works are performed at a dry weather and temperature of not lower than 10 °C.

In the T.G.Shevchenko tram depot (Kyiv) an experimental-industrial trials of the equipment, technology and materials were carried out. The results of trials showed a good quality of the deposited beads, absence of pores and cracks. The deposited layer did not require the post mechanical treatment. The restored region was put into service just after the surfacing.

ботанного оборудования, технологии и материалов, в ходе которой отмечено хорошее качество наплавленных валиков, отсутствие пор и трещин. Наплавленный слой не требовал последующей механической обработки. Восстановленный участок был введен в эксплуатацию сразу после наплавки. Материалы, технология и оборудование для восстановления рельсов необходимы во всех городах Украины и СНГ, где имеется трамвайное сообщение. Только в Украине таких городов насчитывается 25. Следует отметить, что в настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона разрабатывается проволока ферритного класса, которая также позволит восстанавливать трамвайные рельсы без подогрева. Применение проволок этого класса чрезвычайно заманчиво из-за их дешевизны.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМА-МИГ НАПЛАВКИ.** В. В. Чигарев, К. А. Кондрашов (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь, Украина). Способ плазма-МИГ наиболее распространен в варианте наплавки электродом (преимущественно порошковой проволокой), подаваемым под небольшим углом к оси сжатой (плазменной) дуги, горящей с неплавящегося электрода. Второй, менее изученной и мало распространенной, является схема, при которой плавящийся электрод подается через внутреннюю полость неплавящегося электрода. Способ плазма-МИГ может быть отнесен к двухдуговой сварке (наплавке) различными видами электродов. Более того, в последней схеме на поверхность изделия (ванны) последовательно действуют три источника нагрева: передний участок плазменной дуги прогревает и подплавляет зону наплавки, затем происходит процесс плавления основного металла дугой с плавящегося электрода и нанесение расплавленного электродного материала и, наконец, дополнительный повторный нагрев арьергардным участком плазменной дуги. При этом плазменная дуга очищает поверхность детали от оксидов, ионизированный инертный газ стабилизирует характер плавления плавящегося электрода. Устойчивый процесс плавления порошковой электродной проволоки протекает при меньшей плотности тока, и, следовательно, при меньшем давлении дуги. В результате этой особенности способа плазма-МИГ наплавки уменьшается глубина проплавления, снижается перегрев капель и испарение компонентов. Кроме того, возбуждение дуги в ионизированном пространстве происходит без разбрызгивания. Установленные особенности теплоэнергетических процессов, протекающих в зоне горения обеих дуг, нагрева и плавления основного металла и формирования валика, показывают, что период нахождения металла, участвующего в образовании валика (шва), более продолжительный, чем при других дуговых способах наплавки. Наплавленные валики имеют гладкую поверхность, без следов натекания. Рентгеновским контролем установлено, что в определенном диапазоне режимов дефекты практически отсутствуют. Пористость металла наплавленных валиков появляется только при нарушении оптимального соотношения основных параметров режима: тока и напряжения плазменной дуги, а также дуги, горящей с плавящегося электрода. На качество наплавленного металла влияет расход плазмообразующего и защитного газа.

Materials, technology and equipment for rail restoration are in demand in all cities of Ukraine and CIS, where a tram transport is available. Only in Ukraine there are 25 such cities.

It should be noted that the Paton Institute is now developing the wire of a ferritic class which can also be used without preheating. The application of wires of this class is rather attractive because of their cheapness.

#### TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF PLASMA MIG SURFACING. V.V.Chigarev, K.A.Kondrashov (Priazovsky State Technical University, Mariupol, Ukraine).

The method of plasma-MIG is most widely spread in the version of surfacing with electrode (flux-cored wire mainly) which is fed at a small angle to the axis of a constricted (plasma) arc, burning at a non-consumable electrode. In the second scheme, which is not so much studied and spread, a consumable electrode is fed through the inner cavity of the non-consumable electrode. The method of plasma-MIG can be referred to a twin-arc welding (surfacing) with different types of electrodes. Moreover, in the latter scheme three power sources act on the surface of the product (pool) in succession: front area of the plasma arc heats and preheats the zone of surfacing, then the parent metal is melted with an arc from the consumable electrode and the electrode metal is deposited and, finally, the additional reheating by a rear-guard area of the plasma arc. In addition, the plasma arc cleans the surface of the component from oxides. The ionized gas stabilizes the mode of melting of the flux-cored wire occurs at a lower current density, and, consequently, at a lower arc pressure. Due to this feature of plasma-MIG surfacing, the depth of penetration is decreased, the overheating of drops and evaporation of components is reduced. In addition, the arc excitation in an ionized spacing occurs without spattering.

The established peculiarities of the heat-energy processes, proceeding in the zone of burning of both arcs, heating and melting of the parent metal and the bead formation, show that the period of metal dwelling for the bead (weld) formation is longer than that in other arc methods of surfacing. The deposited beads have a smooth surface without the traces of leakage. X-ray examination showed that within the definite range of conditions the defects are almost absent. The porosity of metal of the deposited beads appears only when the optimum relation of main condition parameter is violated: current and plasma arc voltage, and also an arc burning at the consumable electrode. Consumption of plasma-forming and shielding gas influences the quality of the deposited metal.

# ОБРАБОТКА ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАПЫЛЕНИЕМ И НАПЛАВКОЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ.

А. А. Шульженко, С. А. Клименко, Ю. А. Муковоз (Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, г. Киев, Украина). Развитие технологических процессов нанесения износостойких напыленных и наплавленных покрытий позволило разработать эффективные ресурсосберегающие способы упрочнения новых и восстановления изношенных деталей. Однако изделия с поверхностным слоем, сформированным в результате применения технологий газотермического напыления, плазменной или электродуговой наплавки, необходимо подвергать механической обработке для обеспечения требуемых размеров и показателей качества. Износостойкие покрытия высокой твердости обрабатываются традиционными абразивными и режущими инструментами с чрезвычайно низкой эффективностью. Из-за высоких затрат на обработку или невозможности обеспечения механической обработки деталей с такими покрытиями наиболее перспективные износостойкие материалы мало используются в промышленности.

В ИСМ НАН Украины разработаны специальные инструменты на базе поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) — киборита и его модификаций — и синтетического алмаза, которые хорошо зарекомендовали себя при точении износостойких напыленных и наплавленных материалов высокой твердости (HRC 35...65). Проведенный комплекс исследований показал, что PSTM на основе КНБ могут быть успешно использованы при оснащении лезвийного инструмента, предназначенного для обработки износостойких покрытий на основе железа и никеля (например Нп-65Г, ПП-Нп-35В9ХЗСФ, ЛС-5Х4ВЗМФС, ПГ-10Н-01, ПГ-СР5, ПС-12НВК-01 и др.). Инструмент из синтетического алмаза показал перспективность его применения для обработки напыленных покрытий на основе керамики (например  $Al_2O_3$ , TiC и др.). Многие из таких покрытий ранее обрабатывались только шлифованием.

Для обеспечения эффективной и производительной обработки напыленных и наплавленных изделий разработаны различные конструкции инструментов с механическим креплением многогранных непереключаемых режущих пластин (МНРП) из PSTM. Формы и типоразмеры пластины соответствуют стандарту ISO 1832...ISO 1985: диаметр вписанной окружности равняется 7,0...25,4 мм, толщина 2,38...4,76 мм. При необходимости МНРП изготавливают из твердого сплава с впадинами в вершины рабочих элементами из PSTM. Для обеспечения работоспособности инструмента в условиях повышенных температур и динамических нагрузок в течение всего периода стойкости державка инструмента оснащена подкладкой из твердого сплава, которым также армирована соприкасающаяся со стружкой часть прихвата. Обработка покрытий может производиться всухую.

Отличительной особенностью разработанного инструмента является то, что использовать его можно как при окончательной обработке для получения изделия с низкой шероховатостью поверхности, так и

# TREATMENT OF MACHINE PARTS AFTER SPRAYING AND SURFACING USING TOOLS OF POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIALS.

A.A.Shulzhenko, S.A.Klimenko, Yu.A.Mukovoz (V.M.Bakul Institute of Superhard Materials, Kyiv, Ukraine). The development of technological processes of deposition of wear-resistant coatings by spraying and surfacing made it possible to develop the effective resource-saving method of strengthening new parts and restoring worn-out parts. However, the products with a surface layer formed after using the technologies of thermal spraying, plasma or electric arc surfacing, should be subjected to machining to provide the required sizes and quality characteristics. The wear-resistant coatings of a high hardness are treated using the traditional abrasive and cutting tools of a low efficiency. Due to high expenses for treatment or impossibility to provide machining of parts with such coatings, the most advanced wear-resistant materials are seldom used.

The Institute of Superhard Materials has developed special tools on the base of polycrystalline superhard materials (PSHM) using cubic boron nitride (CBN), i.e. cуборит and its modifications, and a synthetic diamond, which proved themselves successfully during sharpening wear-resistant sprayed and surfaced materials of a high hardness (HRC 35-65). The series of investigations showed that PSHM on the base of CBN can be successfully used in cutting edge tools, designed for treatment of wear-resistant coatings on the base of iron and nickel (for example Np-65G, PP-Np-35V9Kh3SF, LS-5Kh4V3MFS, PG-10N-01, PG-SR5, PS-12NVK-01, etc.). The tool made from the synthetic diamond showed its advantages in application for treatment of sprayed coatings on the base of ceramics (for example,  $Al_2O_3$ , TiC, etc.). Many of such coatings were earlier treated only by grinding.

To provide the effective and efficient treatment of sprayed and surfaced products, different designs of tools with mechanical fastening of many-facet non-resharpening cutting plates (MNCP) from PSHM were developed. Shapes and sizes of plates correspond to the standard ISO 1832-1985; diameter of circumference is 7.0-25.4 mm, thickness is 2.38-4.76 mm. When necessary the MNCP are manufactured from hard alloy with top brazed-in working elements from PSHM. To provide serviceability of the tool under the conditions of high temperatures and dynamic loads during the whole period of life, the tool holder is equipped with a hard alloy lining which is also used for reinforcing the part of the clamp which contacts chips. The treatment of coatings is dry.

The developed tool can be used both at a final treatment to provide the product with a small roughness of the surface, and also during a rough treatment when the most defective and rough surface layer of the sprayed or surfaced coating layer is removed. Tools, equipped with MNCP can treat the parts with sprayed and surfaced coatings at a surface roughness up to  $R_a = 0.7-1.25 \mu m$ . The structure of the metal being treated is not changed. Special designs of the tools have been developed whose application provides the surface roughness to  $R_a = 0.15-0.25 \mu m$  during sharpening parts, restored by spraying using powders of the Ni-Cr-B-Si system with a fusion.

The advantages of the process of the cutting edge treatment of sprayed and surfaced coatings of high hard-

в условиях черного прохода, когда удаляется наиболее дефектный и неровный поверхностный слой напыленного или наплавленного покрытия. Инструменты, оснащенные ПСТМ, позволяют обрабатывать детали с напыленными и наплавленными покрытиями с шероховатостью поверхности до  $R_a = 0,70 \dots 1,25$  мкм. В поверхностном слое покрытия обеспечивается отсутствие изменения структуры обрабатываемого материала.

Разработаны специальные конструкции инструментов, применение которых обеспечивает при точении деталей, восстановленных напылением порошками системы Ni-Cr-B-Si с оплавлением, получение шероховатости поверхности до  $R_a = 0,15 \dots 0,25$  мкм. Преимущества процесса лезвийной обработки напыленных и наплавленных покрытий высокой твердости инструментами из ПСТМ по сравнению с существующими процессами шлифования и точения резцами из твердых сплавов различных групп заключаются в том, что их применение обеспечивает повышение производительности обработки соответственно в 3...4 и 4...6 раз при одновременном увеличении стойкости инструмента в 7...10 раз, получение изделий с требуемыми состоянием поверхностного слоя и точностью обработанных деталей, а также снижение стоимости оборудования. Применение такого инструмента дает возможность использовать в производстве деталей машин наиболее перспективные материалы покрытий и технологии их формирования, что обеспечивает высокие эксплуатационные показатели и конкурентоспособность современной техники.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СПЛАВОВ.** Ю. Д. Щицын, Ю. М. Тюткин, В. Ю. Щицын, О. А. Косолапов (Гос. техн. ун-т, г. Пермь, РФ). Сложные условия эксплуатации сварных конструкций (низкие и высокие температуры, агрессивные среды, тяжелое многоосное, а зачастую и циклическое нагружение, комбинированное воздействие неблагоприятных факторов) предъявляют повышенные требования к качеству сварных швов. Удачное сочетание высоких значений мощности и концентрации энергии в сжатой дуге с возможностью использования сварочного и вспомогательного оборудования, разработанного для дуговых способов сварки, предполагает перспективность применения плазменной сварки для производства ответственных сварных конструкций. Очевидно, что повышение производительности сварочных процессов при высоком качестве сварных швов связано с разработкой комбинированных способов, предусматривающих использование двух и более источников нагрева в зоне сварки. Плазменная сварка плавящимся электродом предполагает многовариантность технологических приемов. Глубина проплавления свариваемого металла, форма переноса расплавленного металла электрода, скорость сварки, форма наплавленного валика шва зависят от большого количества параметров, которые условно можно разбить на геометрические, определяемые конструкцией плазматрона и технологические. Авторами разработаны режимы плазменной сварки плавящимся электродом, обес-

печивающие высокую производительность при обработке деталей из цветных металлов и сплавов. Применение ПСТМ в качестве инструмента для обработки деталей из цветных металлов и сплавов позволяет повысить производительность обработки в 3-4 и 4-6 раз, соответственно, при одновременном увеличении срока службы инструмента в 7-10 раз, обеспечивает получение деталей с требуемым состоянием поверхностного слоя, точностью обработки и снижает стоимость оборудования. Применение такого инструмента дает возможность использовать в производстве деталей машин наиболее перспективные материалы покрытий и технологии их формирования, что обеспечивает высокие эксплуатационные показатели и конкурентоспособность современной техники.

**IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PLASMA WELDING OF NONFERROUS METAL AND COMPLEX-ALLOYED ALLOYS.** Yu.D. Shchitsyn, Yu.M. Tytkin, V.Yu. Shchitsyn, O.A. Kosolapov (State Technical University, Perm, Russia). Complicated conditions of service of welded structures (low and high temperatures, aggressive media, heavy multiaxial, and also often cyclic loading, a combined effect of unfavourable factors) specify strict requirements to the weld quality. A favourable combination of high values of power and concentration of energy in a constricted arc with a feasibility of using welding and auxiliary equipment, developed for the arc method of welding, promotes a promising application of the plasma welding for manufacture of critical welded structures.

It is evident, that the increase in the efficiency of welding processes at high quality of welds is associated with the development of the combined methods using two or more heat sources in the zone of welding.

The consumable electrode plasma welding suggests multivariance of technological procedures. The depth of penetration of metal to be welded, mode of a molten electrode metal transfer, speed of welding and shape of the deposited weld bead depend on a large number of parameters, which can be divided conditionally into geometric parameters, determined by the plasmatron design and technological parameters. The authors have developed the conditions of the consumable electrode plasma welding which provide defect-free welds with a preset size at high speeds ( $> 100$  m/h) and thickness of up to 15 mm per one pass without edge preparation and of more than 20 mm with an edge preparation.

печивающие бездефектные сварные швы с заданным размером при больших скорости ( $>100$  м/ч) и толщине свариваемого металла за один проход без разделки кромок — до 15 мм, с разделкой кромок — более 20 мм. В зависимости от требований к сварному шву процесс можно осуществлять обесточенной проволокой, токоведущей проволокой с различной формой переноса электродного металла, заглубленной дугой с плавящегося электрода, пульсирующей сжатой дугой и с подачей дополнительной присадочной проволоки.

Разработан способ плазменной сварки проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки, обеспечивающий сочетание преимуществ сварки проникающей дугой с получением швов с необходимой выпуклостью без дополнительного прохода. Установлены факторы, влияющие на качественное формирование шва при подаче присадочной проволоки. Определены оптимальные режимы сварки и особенности подачи присадочной проволоки, обеспечивающие качественные сварные швы при высокой производительности сварки алюминиевых, титановых и сложнoleгированных сплавов толщиной до 10 мм. Плазменная сварка проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки позволяет получать сварные швы с однородным металлом по сечению шва и одинаковыми с основным металлом механическими свойствами вследствие активного перемешивания основного и присадочного металла в хвостовой части сварочной ванны.

Разработка и применение комбинированных способов плазменной сварки позволят получать бездефектные швы при высокой производительности и экономичности процессов.

#### ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНО-ПЯТЫХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ. К. А. Юценко, А. А. Бондарев, Т. М. Старушенко (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), В. Н. Радзиевский (НИИ Компрессормаш, г. Сумы, Украина), Г. М. Шеленков (АО «НПО им. М. В. Фрунзе», г. Сумы, Украина).

В последнее время увеличилось применение центробежных компрессоров в энергетике, химической, нефтяной, металлургической промышленности и др. Это обусловлено в первую очередь тем, что центробежный компрессор сжимает газ в большом количестве, не загрязняет его смазочными веществами и не требует больших эксплуатационных затрат. Расширение областей применения центробежных компрессоров и большие временные нагрузки в процессе эксплуатации потребовали дальнейшего усовершенствования и повышения надежности отдельных его частей.

Надежность и долговечность центробежного компрессора во многом зависит от сопротивления знакопеременным нагрузкам и уровня усталостной прочности материала, а также от состояния соединений наиболее нагруженных элементов компрессора, в первую очередь, его рабочего колеса, которое является основным элементом проточной части центробежной компрессионной машины.

В центробежных компрессорах большой мощности, как правило, применяются рабочие колеса закрытого типа, состоящие из двух дисков (основного и покрывающего), между которыми находятся лопатки.

Depending on the requirements to the weld, the process can be performed with a dead wire, a current-carrying wire at different mode of the electrode metal transfer, with an immersed arc from the consumable electrode pulsed constricted arc and with a filler wire feeding.

The method of a plasma welding with a penetrating arc with a simultaneous feeding of the filler wire has been developed, that provides a combination of advantages of welding with a penetrating arc with producing welds of a required convexity without an additional pass. Factors are established that influence the quality formation of welds with a filler wire feeding.

Optimum conditions of welding and peculiarities of filler wire feeding are determined, which provide the quality welds and high efficiency of welding aluminium, titanium and complex-alloyed alloys of up to 10 mm thickness. The plasma welding with a penetrating arc with a simultaneous feeding of a filler wire makes it possible to produce welds of a metal similar in weld section and equal to parent metal by the mechanical properties due to an active stirring of parent and filler metal in the weld pool tail part.

Development and application of the combined methods of the plasma welding can provide defect-free welds at a high efficiency and cost effectiveness of the processes.

#### TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF BRAZED-WELDED HEAVY-LOADED IMPELLERS OF CENTRIFUGAL COMPRESSORS. K.A.Yushchenko, A.A.Bondarev, T.M.Starushchenko (E.O.Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine), V.M.Radzievsky (NII Kompresormash, Sumy, Ukraine), G.M.Shelenkov (JSC "M.V.Frunze NPO", Sumy, Ukraine).

Over the recent years the application of centrifugal compressors in power engineering, chemical, oil, metallurgical industries and other branches of engineering is increased. This is explained, first of all, by the fact that the centrifugal compressor compresses the gas in a large amount, does not contaminate it with grease elements and requires small service expenses. The widening of branches of application of centrifugal compressors and long-time loads during service required further improvement and increase in reliability of its separate parts.

Reliability and long life of the centrifugal compressor depend greatly on the resistance to alternate loads and the level of fatigue strength of the material and also joints of the most loaded elements of the compressor, first of all, its impeller, which is the main element of a flow passage of the centrifugal compression machine. In high-power centrifugal compressors the closed-type impellers, consisting of two discs (main and covering) are, as a rule, used. The blades are located between them. Many methods and technologies of manufacture of the compressor impellers are known: casting, electric-spark treatment of interblade spacings, application of riveting of the covering disc to the main disc with integral blades, processes of welding and brazing with solid brazing alloys for securing the discs.

Известны многие способы и технологии изготовления рабочих колес компрессоров: посредством литья, электроискровой обработки межлопаточных пространств, путем применения клепки покрывающего диска к основному диску с цельнофрезерованными лопатками, процессов сварки или пайки твердыми припоями для крепления дисков.

Для повышения статической и динамической прочности колес, увеличения продолжительности их эксплуатации и достижения сверхвысоких степеней ожатия при изготовлении рабочих колес используют высокопрочные и коррозионно-стойкие стали, что требует новых подходов как в технологии их изготовления, так в выборе материалов.

Технология изготовления рабочих колес включает комбинацию способов сварки и пайки для крепления основного и покрывающего дисков. На первом этапе применяется электронно-лучевая сварка покрывающего диска посредством наложения прорезных швов к лопаткам основного диска. С помощью программирования параметров режима производится проплавление лопатки не менее чем на  $2/3$  ее толщины в месте контакта с покрывающим диском. Обеспечение равнопрочного таврового соединения достигается на втором этапе технологического цикла, когда непроваренные участки лопаток соединяются с покрывающим диском припоем при пайке в вакуумной печи.

Для придания газовым каналам колес наиболее эффективной газодинамической формы перед пайкой в углах таврового соединения размещают металлический порошок. После пропитки порошка расплавленным припоем формируются галтели радиусом 5...10 мм и при этом устраняются концентраторы напряжений.

В условиях производственного освоения данной технологии рабочие колеса диаметром 850 мм изготавливали из стали 07X16N6. Приварку покрывающего диска толщиной 20 мм выполняли на электронно-лучевой установке от источника питания с ускоряющим напряжением 60 кВ. Пайку осуществляли в вакууме припоем на медно-никелевой основе при температуре, превышающей температуру закалки стали 07X16N6. После балансировки колеса подвергали разгонным испытаниям при частоте вращения, на 10...15 % превышающей рабочую скорость вращения ротора.

Разработанная в Институте электросварки им. Е. О. Патона технология изготовления сварно-паяных высоконагруженных рабочих колес центробежных компрессоров освоена на АО «НПО им. М. В. Фрунзе» в г. Сумы.

**СВАРКА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ.** К. А. Ющенко, Д. В. Коваленко, И. В. Коваленко, В. А. Пестов (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Разработаны и получили широкое применение аэрозольные активаторы серии ПАТИГ. Приводятся сведения о возможности сварки высоколегированных сталей с 5...25 % хрома, хромоникелевых сталей мартенситного и ферритного класса с содержанием никеля до 45...50 %, сплавов на основе никеля, ко-

To increase the static and dynamic strength of impellers, to increase their service life and achieve the superhigh compression levels, the high-strength and corrosion-resistant steels, which require new approaches both in technology of their manufacture and selection of materials are used in manufacture of the impellers.

The technology of manufacture of impellers includes the combination of methods of welding and brazing for fastening main and covering discs. At the first stage the electron beam welding of the covering disc by deposition of slot welds to the blades of the main disc is used. With programming the condition parameters the blades are melted to not less than  $2/3$  of their thickness in the spot of contact with the covering disc. The strength of the T-joint is attained at the second stage of the technological cycle, when the non-penetrated regions of the blades are joined with a covering disc using a brazing alloy by brazing in the vacuum furnace.

To impart an effective gas-dynamic shape to the impeller gas channels before brazing a metallic powder is placed in the fillets of the T-joint. After powder impregnation with a molten brazing alloy the fillets of 5-10 mm radius are formed and the stress raisers are removed.

In the conditions of industrial mastering of this technology the impellers of 850 mm diameter were manufactured of 07Kh16N6 steel. The welding-on of the 20 mm thick covering disc was made in the electron beam equipment supplied from a power source with 60 kV accelerating voltage. The brazing was performed in vacuum using a brazing alloy on copper-nickel base at a temperature that exceeds the temperature of the 07Kh16N6 steel hardening. After balancing, the impellers were subjected to running test at the rotation frequency exceeding by 10-15 % the working speed of the rotor rotation. The technology of manufacture of brazed-welded heavy-loaded impellers of centrifugal compressors developed at the E.O.Paton Electric Welding Institute was implemented at JSC "M.V.Frunze NPO" in Sumy city.

**WELDING OF HIGH-ALLOYED STEELS AND NICKEL ALLOYS USING ACTIVATED FLUXES.** K.A.Yushchenko, D.V.Kovalenko, I.V.Kovalenko, V.A.Pestov (E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine). Aerosol activators of the PATIG series have been developed and found a wide application. Information about the feasibility of welding of high-alloyed steels with 5-25 % Cr, chrome-nickel steels of a martensitic and ferritic class with a nickel content of up to 45-50 % and alloys on the base of nickel, cobalt and copper is given. Theoretical problems of interaction of the "activator-arc-pool" sys-

бальта, меди. Рассматриваются теоретические вопросы взаимодействия системы активатор-дуга-ванна. Приводятся данные о сварке с использованием активаторов серии ПАТИГ новых видов конструкций для тепловой и атомной энергетики, химического и нефтяного машиностроения, авиакосмической техники. Показана высокая эффективность использования активаторов ПАТИГ при выполнении ремонтных работ, а также при применении комбинированных процессов сварки.

#### ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. А. Наконечный (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина). Дуговая сварка расходуемым электродом имеет ограниченное применение, особенно когда необходимо соединять трудносвариваемые металлы или композиты со сложной системой легирования и структурой. В этом случае практически невозможно получить сварочную проволоку, что связано не только с трудностью выплавки металла, но и с осуществлением всех стадий обработки (ковка, протяжка, экструзия, волочение). Для сварки используют порошковую присадку в порошковых проволоках.

Применение порошков различного состава и грануляции (как металлических, так и композиционных) в виде механических смесей позволило получать покрытия с наперед заданными функциональными свойствами.

В ИЭС им. Е. О. Патона выполнен цикл работ по применению порошков для сварочных работ. Использован способ плазменно-порошковой сварки, при котором порошок подается в плазму, заполняет разделку и таким образом обеспечивается получение качественного сварного соединения. Процесс проверен при механизированной и ручной сварке металла толщиной 1...50 мм на токах от 10 до 500 А. Изучены особенности формирования соединений при сварке сталей различных марок, в том числе высоколегированных сплавов на основе никеля, кобальта, меди, алюминия, титана. Хорошо свариваются чугун, а также высокопрочные стали. Достаточно легко получить сварные соединения на металле способом порошковой металлургии, который может осуществляться во всех пространственных положениях. Универсальность способа и широкие возможности варьирования составами присадочных порошков открывают новые возможности получения неразъемных соединений металлических, композиционных и керамических материалов.

#### ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ГТД.

В. С. Рылников (ГП ГНЦ «ВИАМ», г. Москва, РФ), А. П. Шатов, В. И. Царев (ГУП ТМКБ «Союз»). Разработана технология восстановления лопаток сопловых аппаратов (СА) ГТД из жаропрочного сплава на никелевой основе типа ЖС6К с применением пайки в вакуумной печи.

Ремонту подлежат лопатки с эксплуатационными повреждениями пера, полок в виде трещин, забоин, местного обгорания и других дефектов.

Отбраковка лопаток при ремонте имеет относительно высокий уровень, что вызывает необходимость изготовления новых лопаток, а это существенно повышает стоимость ремонта. Актуальность разработки данной технологии ремонта обусловлена воз-

растением потребности в ремонте. Данные даны о сварке новых типов конструкций для тепло- и атомной энергетики, химического и нефтяного машиностроения, авиакосмической техники. Показана высокая эффективность использования активаторов ПАТИГ при выполнении ремонтных работ, а также при применении комбинированных процессов сварки.

#### ПЛАЗМА-ПОРОШКОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. А. Наконечный (Е. О. Патон Электрический Сварочный Институт, Киев, Украина).

The consumable electrode arc welding has a limited application, in particular, when it is necessary to join the hard-to-weld metals or composites with a complex system of alloying and structure. In this case it is almost impossible to produce the welding wire, that is due not only to the difficulties in melting the metal, but also to the realizing all stages of processing (forging, drawing, extrusion). For welding the powder additive to the flux-cored wires is used.

The application of powders of different composition and granulation (both metallic and composite) in the form of mechanical mixtures could provide coatings with preset functional properties.

The Paton Institute has performed a number of works on application of powders for welding. The method of plasma-powder welding is used, in which the powder is fed to the plasma, fills the groove and, thus, the quality welded joint is provided. The process was tested in mechanized and manual welding of 1-50 mm thickness at currents from 10 up to 500 A. The peculiarities of joint formation are studied in welding steels of different grades, including high-alloyed alloys on the base of nickel, cobalt, copper, aluminium and titanium. Cast iron and also high-strength steels are well welded. It is easy to produce welded joints on metal using the method of a powder metallurgy which can be realized in all spatial positions. Versatility of the method and wide possibilities to vary the compositions of powder additives open up the new opportunity of producing permanent joints of metallic, composite and ceramic materials.

#### ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. В. С. Рылников (ВИАМ, Москва, Россия), А. П. Шатов, В. И. Царев (Государственный Предприятие «Технический Центр «Союз»).

Technology of repair of blades of nozzle unit (NU) of gas-turbine engines (GTE) from heat-resistant alloy on nickel base of ZhS6K type using brazing in a vacuum furnace has been developed.

The blades with service damages of airfoils, flanges in the form of cracks, dents, local burning-off and other defects are subjected to the repair.

Rejection of blades during repair is comparatively large, which makes it necessary to manufacture new blades, and this increases significantly the cost of the repair. Actuality of development of this technology of repair is

возможностью восстановления значительной части лопаток, забракованных по литейным дефектам при их изготовлении, а также отсутствием других технологических решений.

Процесс восстановления сопловых лопаток ГТД в вакуумных печах включает следующие операции: контроль при помощи цветной дефектоскопии лопаток, снятие алитированного слоя, электроэрозийную вырезку дефектов и изготовление вставок для пайки дефектных мест, процесс пайки в вакуумной печи, удаление механическим путем выступающих частей вставок, рентгеновский контроль паяных соединений, нанесение покрытий на лопатки. Получение показателей жаропрочности паяных соединений, близких к таковым материала лопаток из никелевых сплавов, представляет сложную задачу. При разработке припоя используется комплексное легирование, позволяющее сократить продолжительность диффузионного выравнивания состава шва и основного материала сопловых лопаток. При этом не происходит значительного перераспределения элементов в системе припой-основной материал, отсутствуют нежелательные фазовые реакции в диффузионных зонах. Для каждой марки сплава сопловых лопаток подобран состав припоя таким образом, чтобы температура пайки совпала с температурой термовакуумной обработки никелевого сплава, что обеспечивает получение регламентируемой структуры основного материала после пайки. В результате использования разработанной технологии существенно увеличивается ресурс эксплуатации сопловых лопаток ГТД и сокращаются расходы, связанные с их изготовлением.

**РАЗРАБОТКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.** М. Н. Сивцев, О. И. Слепцов (Ин-т физ.-техн. пробл. Севера ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, РФ). При выборе материалов для сварных конструкций, эксплуатируемых в северных условиях, ориентируются на уровень ударной вязкости, отсутствие холодных трещин, равнопрочность сварных соединений, обеспечение заданных механических свойств. Проведены исследования по следующим направлениям:

- изучение феноменологии явления образования холодных трещин при сварке и установление факторов, ответственных за их образование;
- разработка сварочных материалов, обеспечивающих малое содержание водорода в наплавленном металле и отсутствие холодных трещин в металле сварных соединений. Установлено, что различие в коэффициентах диффузии в аустенитном, ферритном и мартенситном материалах позволяет более чем в 3 раза сократить длительность сохранения повышенной концентрации водорода в ОШЗ сварного соединения при отрицательных температурах. Для уменьшения степени поглощения водорода сварочной ванной в состав сварочного материала вводятся некоторые оксиды и фториды. Выполняется также легирование металла шва редкоземельными или переходными металлами, соединения которых (оксиды, карбиды и карбонитриды) могут служить ловушками водорода, аккумулировать и удерживать водород, затрудняя его диффузию. Введение в сос-

explained by a feasibility of restoration of a large number of the blades, rejected because of the foundry defects during their manufacture, as well as by the absence of other technological solutions.

The process of restoration of nozzle blades of the GTE in vacuum furnaces includes the following operations: inspection using the dye penetrant flaw detection of the blades, the removal of an aluminized layer, electroerosion cutting-out of defects and manufacture of inserts for brazing the defective areas, process of brazing in a vacuum furnace, machining of projecting parts of the inserts, X-ray control of the brazed joints, deposition of coatings on the blades. To obtain characteristics of high-temperature strength of the brazed joints close to those of the material of nickel alloy blades is a complicated problem. When the brazing alloy is developed, a complex alloying is used for shortening the duration of diffusion levelling of the composition of weld and parent material of the nozzle blades. Here, there is no noticeable redistribution of elements in brazing alloy — parent material system, and there are no undesirable phase reactions in the diffusion zones. For each grade of alloy of the nozzle blades a composition of the brazing alloy is selected in such a way that the brazing temperature matches the temperature of a thermovacuum treatment of the nickel alloy, thus providing the regulated structure of the parent material after brazing.

The developed technology resulted in a significant increase in a service life of the GTE nozzle blades and in decrease of expenses for their manufacture.

#### DEVELOPMENT OF WELDING CONSUMABLES FOR ENSURING RELIABILITY OF WELDED STRUCTURES AT LOW TEMPERATURES.

*M.N. Sivtsev, O.I. Sleptsov (Institute of Physical and Technical Problems of North, Yakutsk, Russia).* The selection of materials for welded structures used under the North condition is oriented on the level of an impact strength, absence of cold crack, strength of welded joints and assurance of the preset mechanical properties.

The investigations were carried out according to the following directions:

- study of phenomenon of cold crack formation during welding and establishing of factors which cause their formation;
- development of welding consumables which provide a low content of hydrogen in the deposited metal and avoid cold crack formation in the welded joint metal. It was established that the difference of a coefficient of diffusion in austenitic, ferritic and martensitic materials can reduce by more than three times the duration of preserving the increased concentration of hydrogen in HAZ of the welded joint at negative temperatures. To decrease the degree of hydrogen absorption by the weld pool, some oxides and fluorides are introduced into the composition of the welding consumables. The weld metal is also alloyed with rare earth or transition metals, whose compounds (oxides, carbides and carbonitrides) can serve as traps of hydrogen, accumulate and preserve hydrogen, thus making its diffusion difficult. The introduction of ultradispersed powders of refractory compounds to the composition of welding consumables makes it possible to regulate the processes

тав сварочных материалов ультрадисперсных порошков тугоплавких соединений позволяет регулировать процессы структурообразования при затвердевании сварочной ванны, а также препятствовать диффузии водорода в ЗТВ.

Разработаны принципы микролегирования наплавленного металла путем введения в покрытие электродов магнетитовых шлихов АО «Алданзолото», содержащих до 2 % редкоземельных шлихов лантаноидной группы, а также полевого шпата Алданского щита (с содержанием щелочных компонентов до 15 %).

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИТТРИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.** Н. Г. Ефименко (Укр. инж.-пед. акад., г. Харьков, Украина). Введение в состав железоуглеродистых сплавов, в том числе и сварочных материалов, добавок редкоземельных металлов (РЗМ) повышает сопротивление металла переходу в хрупкое состояние.

Вместе с тем во взглядах относительно воздействия РЗМ на физико-механические свойства стали не существует единого мнения.

Цель работы — комплексная оценка влияния иттрия на низкотемпературное поведение металла. Результаты исследований позволяют прояснить многие моменты и упростить подходы к проблеме использования иттрия при сварке стали.

Исследовали сталь 30 (0,3 % C; 0,5 % Mn; 0,25 % Si; 0,02 % P; 0,03 % S), близкую по содержанию углерода к углеродистой и низколегированной конструкционной сталям. В качестве микродобавки использовали 0,025; 0,045; 0,084; 0,21; 0,4; 1,6 % иттрия, оказывающего наиболее эффективное воздействие на металл сварных швов.

Субструктуру металла изучали методом внутреннего трения (ВТ). Температурную амплитудную зависимость ВТ исследовали на релаксметре типа обратный крутильный маятник.

Структуру металла изучали с помощью оптической и электронной микроскопии. Период решетки устанавливали на рентгенограммах, а также посредством записи профиля интерференционных максимумов на установке ДРОН-2. Механические свойства определяли по стандартным методикам.

Установлено, что содержание иттрия в стали до 0,08 % снижает фон ВТ, что свидетельствует о формировании стабилизированных структур и связано с увеличением силы Пайерса-Набарро, с общим уменьшением количества дислокаций и с более сильным их закреплением примесными атомами. Фон ВТ составляет 0,50; 0,58; 0,76; 1,48 соответственно в сталях с 0,08; 0,045; 0,16 % иттрия и без него.

Наиболее чувствительным фактором, характеризующим изменение уровня закрепления дислокаций, является термическая стабильность кристаллической структуры. Интенсивный отрыв дислокаций установлен в области температур 280...300 °C в сталях без иттрия и с 0,16 % Y. В сталях с 0,045 и 0,08 % Y температура отрыва повышается до 400 °C. Установлено неоднозначное изменение периода решетки  $\alpha$ -фазы и микротвердости феррита (Ф) и перлита (П). Содержание до 0,045 % Y приводит к ее росту (что указывает на его растворение в твердом растворе), к увеличению энергии связи атомов в ре-

of structure formation during the weld pool solidification and also to prevent diffusion of hydrogen towards HAZ. Principles of microalloying of deposited metal by introduction of magnetite heavy concentrates of JSC «Алданзолото» to the coating of electrodes were developed. These concentrates contain up to 2 % of rare-earth heavy concentrates of lanthanum-cerium group, extracted from the coals of the Lensky basin together with rare-earth elements, as well as a feldspar of the Aldan shield (with content of alkali components up to 15 %).

#### INTEGRATED EVALUATION OF YTTRIUM EFFECT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON STEEL USED FOR WELDED STRUCTURES. N.G. Efimenko

(Ukrainian Engineering-Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine). Rare-earth metals, added to the composition of iron-carbon alloys, and also to the welding consumables, increase the metal resistance to the brittle state transition.

However, there is no single opinion as to the nature of REM effect on the physical and mechanical properties of steel.

This work is aimed at the integrated evaluation of yttrium (Y) effect on the low-temperature behaviour of metal. Results of investigations can clarify many unclear moments and simplify approaches to the problem of yttrium used for steel welding.

Steel 30, close by the content of carbon to the carbon low-alloyed structural steel was investigated. The composition of this steel was as follows, %: C-0.3; Mn-0.5; Si-0.25; P-0.02; S-0.03. Yttrium was used as microaddition in the following amounts, %: 0.25; 0.045; 0.084; 0.21; 0.4; 1.6, which have the highest effect on the weld metal.

Substructure of the metal was examined by the method of an inner friction (IF). The temperature amplitude relation of IF was studied in relaxometer of "reversible torsion pendulum" type.

Structure of metal was examined using optical and electron microscopy. The lattice spacing was determined in roentgenograms, and also by recording the profile of interference maximums in DRON-2 installation. Mechanical properties were determined using standard procedures.

It was established that yttrium content in steel of up to 0.08 % reduces the IF background that indicates to the formation of stabilized structures and is due to increase in Pierce-Nabarro force, total decrease in number of dislocations and their stronger pinning with impurity atoms. The recorded IF background is 0.5, 0.58, 0.76 and 1.48, respectively, in steel with 0.08 % Y, 0.045 % Y, 0.16 % Y and without Y.

The thermal stability of the crystalline structure is the most sensitive factor which characterizes the change of level of pinning of dislocations. The intensive detachment of dislocations is established in the range of temperatures 250-300 °C in steels without yttrium and with 0.16 % Y. In steels with 0.045 % Y and 0.08 % Y the temperature of detachment is increased up to 400 °C. Non-single-valued nature of changing the lattice spacing  $\alpha$ -phase and microhardness of ferrite (F) and pearlite (P) is established. The yttrium content of up to 0.045 % leads to its growth that indicates to its dissolution in a solid solution, to the increase in energy of

шетке; от 0,045 до 0,16 % Y — вызывает ее уменьшение; свыше 0,16 % Y — снова начинается увеличение. Изменение периода решетки коррелирует с изменением микротвердости Ф и П.

Резкое уменьшение степени искажения кристаллической решетки при 0,08 % Y связано с рафинированием твердого раствора, изменением энергии взаимодействия примесей внедрения с дислокациями при растворении в стали атомов замещения, что согласуется с данными изменения ВТ. Изменяется дисперсность структуры: при 0,08 % Y размер зерна составляет 2...16 мкм против 5...40 мкм в стали без иттрия. Варьируется соотношение феррита и перлита от 20 до 80 %. Дальнейшее увеличение иттрия уменьшает содержание П и соответственно увеличивает количество Ф. Происходит дробление перлитных колоний. Таким образом, иттрий, в зависимости от введенного количества, оказывает сложное влияние на металл, а механизмы влияния — легирование, рафинирование, модифицирование — имеют тесную взаимосвязь.

Содержание в стали 0,03...0,10 % Y приводит к значительному улучшению механических свойств. Ударная вязкость при температуре - 60 °C повышается на 70 % по сравнению с исходным вариантом.

bond of atoms in the lattice. The content of yttrium from 0.045 to 0.16 % causes its decrease, while at content of above 0.16 % the growth starts again. The change in the lattice spacing is correlated with a change in microhardness of the ferrite and pearlite.

The abrupt decrease in the extent of the crystalline lattice distortion at yttrium content up to 0.08 % is associated with a refining of the solid solution, change in energy of interaction of interstitial impurities with dislocations during dissolution of substitutional atoms in steel, that is correlated with data of changing IF. The structure dispersity is changed: at 0.08 % Y the grain size is 2-16  $\mu\text{m}$  against 5-40  $\mu\text{m}$  in steel without yttrium. The ratio of ferrite and pearlite is changed from 20 to 80 %. The further increase of yttrium decreases the pearlite content and, respectively, increases the ferrite content. The crushing of pearlitic colonies occurs. Thus, yttrium, depending on the amount introduced, has a complex effect on metal, and the mechanisms of effect: alloying, refining, modifying, have a close relation.

The 0.03-0.10 % content of yttrium in steel leads to a great increase in the whole complex of mechanical properties. The impact strength at temperature - 60 °C is increased by 70 % as compared with an initial variant.

**СЕРТИФИКАЦИЯ  
ПРОДУКЦИИ  
СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА  
И АТТЕСТАЦИЯ  
СПЕЦИАЛИСТОВ**

**CERTIFICATION  
OF PRODUCTS  
OF WELDING  
INDUSTRY  
AND ATTESTATION  
OF SPECIALISTS**

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В СИСТЕМАХ КАЧЕСТВА, АДАПТИРОВАННЫЕ К ТРЕБОВАНИЯМ ИСО-9000. Л. С. Денисов (Науч.-исслед. и кон-

трук.-технол. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). Установлено, что при проведении сварочных работ в цеху и на строительном объекте с разной степенью активности проявляется влияние всевозможных факторов на ход и стабильность технологических процессов, а в результате — на качество сварных соединений конструкций или изделий.

Каждый фактор (условия работ) можно охарактеризовать присущими ему параметрами. Например, из фактора «Сварочные материалы» покажем «Сварочные электроды», имеющие следующие параметры:

- внешнее состояние покрытия  $X_1$ ;
- прочность покрытия  $X_2$ ;
- концентричность покрытия  $X_3$ ;
- влажность покрытия  $X_4$ ;
- состояние электродного стержня  $X_5$ ;
- сварочно-технологические показатели  $\Sigma X_i$  и др.

Аналогично можно привести параметры и для других факторов. Параметры факторов должны иметь размерность и области допускаемых значений. Установлена зависимость состояния факторов от состояния его параметров и дефектности, позволяющая конструировать параметрические модели.

Оптимизировать параметры дает возможность определять границы их допустимых значений. Выход параметра за границы допуска начинает отрицательно влиять на технологические процессы, дестабилизировать их и приводить к появлению дефектности при формировании сварного соединения и к его низкому качеству. В этом случае необходимо устанавливать причины, вызывающие выход параметров за пределы допустимых значений. Например, высокая влажность покрытия (обмазки) электродов формируется по следующим причинам: плохая упаковка, неправильные погрузка, разгрузка и складирование; неудовлетворительная транспортировка; сырой, неотапливаемый склад; электроды перед употреблением не прокалены; сварщик не имеет герметичного пенала для электродов и т.д.

Анализ состояния параметров факторов производили по параметрическим моделям, представляющим каждый отдельный фактор с набором параметров,

характеризующих этот фактор как  $\Phi \rightarrow F \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)$ . При

анализе устанавливают значимость и степень влияния каждого параметра. При исследовании формирования качества сварного соединения  $K_{c.c.}$  использовали многофакторные модели с расчетными значениями каждого фактора:  $K_{c.c.} \rightarrow F \left( \sum_{i=1}^5 \Phi_i \right)$ . Схемы

моделей с оптимизационными значениями факторов в дальнейшем использовали для корректировки технологических процессов. Для выхода на рынки Европы и признания продукции, соответствующей международным и европейским требованиям, необходимо гармонизировать (привести в соответствие с ИСО и EN или разработать новые) стандарты Республики Беларусь. Эти работы с 1998 г. начали выполняться НИКТИ СП с ОП в рамках программы

# PARAMETRIC MODELS IN QUALITY SYSTEMS ADAPTED TO THE ISO 9000 REQUIREMENTS.

L.S.Denisov (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus). It is established that during welding operations under shop or site conditions the effect of different factors and conditions influences with a different intensity on the proceeding and stability of technological processes and, consequently, on the quality of welded structures or products.

Each factor (work conditions) can be characterized by typical parameters. Let us call them factor parameters. For example, from "Welding consumables" factor, we shall demonstrate "Welding electrodes" which have the following parameters:

- visual condition of the coating  $X_1$ ;
- strength of coating  $X_2$ ;
- concentricity of coating  $X_3$ ;
- humidity of coating  $X_4$ ;
- condition of electrode core  $X_5$ ;
- welding-technological characteristics  $\Sigma X_i$ , etc.

In a similar way it is possible to illustrate the parameters for other factors. Parameters of factors should have dimensions and ranges of allowable values. The dependence of condition of factors on the condition of their parameters and defectness has been established that makes it possible to design the parametric models. Optimizing of parameters gives an opportunity to define the limits of their allowable values. Parameter beyond this limit starts to affect negatively the technological processes, to destabilize them and to lead to the initiation of defects during the joint formation, thus deteriorating its quality. In this case it is necessary to determine the causes of coming parameters beyond the limits of allowable values. For example, a high humidity of coating (covering) of electrodes is caused by the following reasons: poor packaging, unproper transportation, nonheated wet store; electrodes were not baked before use; welder has no an air-tight case for electrode, etc.

Analysis of condition of parameters of factors was made using the parametric models which present each separate factor with a system of parameters characterizing

this factor as  $\Phi \rightarrow F \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)$ . During analysis the value

and degree of effect of each factor are established. During examination of the formation of the welded joint quality  $K_{c.c.}$ , the multifactor models with calculated values of each factor were used:  $K_{c.c.} \rightarrow F \left( \sum_{i=1}^5 \Phi_i \right)$ . Schemes

of models with optimizing values of factors were further used for the correction of technological processes. To enter the European markets and to provide products which will be recognized and will correspond to International and European requirements, it is necessary to harmonize the standards of Belarus (to bring in conformity with ISO and EN or to develop new standards). Since 1998 these works were started in the above-mentioned Institute within the scope of program "Welding". During working out the harmonized standards the principle of parametric and factor approach can noticeably add to the systems of quality of ISO

«Сварка». При разработке гармонизированных стандартов принцип параметрического и факторного подхода позволяет существенно дополнить системы качества по ИСО-9000, внося важный элемент количественного измерения при анализе, оценке и обеспечении качества продукции сварочного производства.

В рамках принятой концепции качества рассматривается система корректировки процессов и управления качеством на основе количественной оценки качества, планирования качества на предприятиях, заводах и организациях машиностроения, строительства, нефтехимии, энергетики, сельского хозяйства и других отраслей.

#### **СЕРТИФИКАЦИЯ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ.** Л. С. Денисов (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь).

Госстандартом Республики Беларусь созданы и функционируют национальная система и структура сертификации продукции производств с развитой сетью органов по сертификации, испытательных центров и лабораторий. Сертификация продукции выступает как независимая и документированная оценка качества и безопасности процессов, предметов, средств труда и конечной продукции.

Орган по сертификации продукции сварочного производства НИКТИ СП с ОП аккредитован Госстандартом в Национальной системе сертификации в 1994 г. и выполняет работы по заявкам организаций, предприятий, заводов, фирм и частных предпринимателей в соответствии с действующими стандартами в республике. Для функционирования органа в НИКТИ СП с ОП разработаны и утверждены Госстандартом следующие документы:

- положение об Органе по сертификации сварочной продукции;
- положение о порядке проведения процедур сертификации;
- руководство по качеству;
- необходимые инструкции, документы, методики и программы испытаний.

Кроме того, созданы и аккредитованы испытательные лаборатории.

Сертификация продукции сварочного производства — добровольная (по инициативе предприятия) и обязательная на предмет обеспечения безопасности продукции, процессов и услуг (по инициативе государства) процедура, установленная на сварочное оборудование любого назначения, электрододержатели, горелки для сварки в защитных газах и др., на щитки защитные для электросварщиков, на сварочные материалы (электроды, металлическую и порошковую проволоку). Методическое руководство и контроль за работой Органа осуществляет Управление по сертификации Госстандарта Республики Беларусь.

К наиболее ответственной части сертификации следует отнести полноту разработки программы анализа состояния производства и проведения анализа непосредственно на производстве от проекта (проектной, технической и нормативной документации) до каждой технологической операции и исполнителей; от входного контроля и склада поступающих материалов, комплектующих до операционного кон-

9000, introducing an important element of a quantitative measurement during analysis, assessment and assurance of quality of the weldments.

Within the scope of an accepted conception of quality a system of correction of processes and quality control is regarded on the basis of a quantitative evaluation of quality, planning of quality at the enterprises, factories and organizations of machine-building, construction, oil chemistry, power engineering, agriculture and others.

#### **CERTIFICATION AND QUALITY OF PRODUCTS OF WELDING INDUSTRY IN REPUBLIC OF BELARUS.**

L.S. Denisov (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus). The Gosstandart of Belarus has created the functioning now national system and structure of certification of production which is realized by a network of bodies on certification, test centres and laboratories. Certification of production is an independent and documented assessment of quality and safety of processes, objects, equipment and final products.

Body on certification of welding fabrication products of the above-mentioned Institute was accredited by Gosstandart in the National system on certification in 1994 and fulfils the works by the applications of organizations, enterprises, factories, companies and private businessmen in accordance with existing standards in Belarus. For this body functioning the following documents were worked out and approved by Gosstandart:

- Status of Body of certification of welding products;
- Status of procedures of certification;
- manual on quality;
- required instructions, documents, test methods and programs.

In addition, test laboratories are created and accredited. Certification of welding industry products is voluntary (by initiative of enterprise) and mandatory for assurance of safety of products, processes and services (by initiative of government). The latter is established for different-purpose welding equipment, electrode holders, torches for shielded-gas welding, protective shields for electric welders, welding consumables (electrodes, solid and flux-cored wire). Activity of the Body is supervised by the Board on certification of Gosstandart of Belarus.

The most important part of the certification includes the development of program of audit of the status of production and making the analysis directly at the production facility starting from designing ( design, technical and standardizing documentation) up to each technological operation and executors; from incoming control and storage of supplied materials, completing parts up to in-process control and acceptance tests of finished products with their packing, storing and transportation. As the practice shows the most complicated, and sometimes difficult-to-perform operations for the enterprises are: incoming control of raw materials and completing parts; identification of products and following all

троля и приемосдаточных испытаний готовой продукции с ее упаковкой, складированием и транспортировкой. Как показывает практика, наиболее сложными, а подчас трудновыполнимыми для производства и предприятий являются входной контроль сырья, материалов и комплектующих; идентификация продукции и прослеживаемость; управление процессами; контроль и проведение испытаний; корректирующие и предупреждающие действия; управление регистрацией данных о качестве.

Ответственной частью сертификации является отбор образцов готовой продукции для проведения сертификационных испытаний в аккредитованных лабораториях; разработка программы испытаний отобранных образцов продукции в соответствии с действующей нормативной документацией (НД). И наконец, рассмотрение советом по сертификации материалов и принятие решения о выдаче сертификата или об обоснованном отказе.

В процессе сертификации НИКИ СП с ОП проводит статистический анализ технического уровня выпускаемой продукции. Исследуются дефектоносные процессы, причины их образования, рекомендуются меры по совершенствованию технологических процессов и качества выпускаемой продукции на предприятии, заводе, фирме.

Приведены результаты статистического анализа для производств некоторых типов сварочных электродов и оборудования, недостатки, выявленные в НД; указаны предприятия и организации, имеющие сертификаты соответствия национальной системы Госстандарта Республики Беларусь, выданные Органом по сертификации.

#### ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ, ЗАТРАТЫ НА КАЧЕСТВО И ДОСТИЖЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. Л. С. Денисов (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защит. покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь), П. В. Занковец (Ин-т экономики НАНБ, г. Минск, Республика Беларусь). Разработана

многофакторная экономико-математическая модель расчета, оценки и прогнозирования уровня качества в сварочном производстве в зависимости от затрат. В модели формализуются основные технико-экономические закономерности процессов совершенствования технических и технологических параметров объектов, что позволяет получать количественные оценки для следующих направлений в совершенствовании сварочно-монтажного производства: разработка и освоение принципиально новых поколений техники и технологий; дальнейшее совершенствование факторов качества при неизменных принципах их действия; снижение объемов затрат, необходимых для достижения требуемых количественных значений уровня качества.

Экономико-математические модели реализуются в виде алгоритмов и программ для автоматизированного режима получения результатов и в виде графоаналитической модели при ручном способе.

Графоаналитическая модель технико-экономических процессов совершенствования параметров качества основывается на линеаризации взаимосвязи предел параметра – параметр качества, объединенных в понятие сложность – затраты, и позволяет получить по сварочно-монтажному производству сле-

processes; control of processes; inspection and tests; correcting and preventing operations; control of recording the data about quality.

The responsible part of certification is a selection of ready products for certification tests in accredited laboratories; development of test programs of selected samples of products in accordance with an existing standardized documentation (SD). And, finally, decision of the council on certification of materials about issue of the certificate or about a justified rejection.

In the course of certification, the Institute carries out statistic analysis of the technical level of the output products. Defect-carrying processes, causes of these defects are examined and measures on improvement of technological processes and quality of the products at the enterprise, factory or company are recommended. Results of statistic analysis are given for manufacture of some types of welding electrodes and equipment; enterprises and organizations are indicated which have a certificate of conformity to the national system of Gosstandart of Belarus, issued by the Body of certification.

#### TECHNICAL LEVEL, EXPENSES FOR QUALITY AND ACHIEVEMENT OF COMPETITIVENESS IN WELDING INDUSTRY. L.S. Denisov (Research & Development Institute for Welding and Protective Coatings with Pilot Production, Minsk, Belarus), P.V. Zankovets (Institute of Economy, NASB, Minsk, Belarus). Multifactor economic-mathematical model of calculation, assessment and prediction of the quality level in welding industry, depending on expenses, has been developed. The model formalizes main technico-economical regularities of processes of improvement of technical and technological parameters of objects that makes it possible to obtain the quantitative estimates for the following trends in the improvement of welding-assembly fabrication: development and implementation of radically new generations of technology and technique; further improvement of quality factors at unchanged principles of their effect; reduction in volumes of expenses to attain the required quantitative values of the quality level.

Economic-mathematical models are realized in the form of algorithms and programs for automated conditions of producing results and in the form of graphical-analytical model at the manual method.

The graphical-analytical model of technico-economical processes of improvement of quality parameters is based on the linearization of "parameter limit — quality parameter" relations united in a conception of "complexity — expenses", and makes it possible to obtain the following quantitative estimates for the welding-assembly fabrication: technical level (TL), level of economy (LE), expenses for achievement of a preset value of the quality parameter  $P$ . TL is an analytical function of com-

дующие количественные оценки: технического уровня (ТУ), уровня экономичности (УЭ), затрат на достижение заданного значения параметра качества  $P$ . ТУ является аналитической функцией сложности  $S$  и вычисляется с учетом предела используемого параметра качества. Математические модели оценок сложности  $S$  и ТУ при разложении в ряды приводят к общепринятым моделям для оценок затрат и ТУ, когда влияние пределов еще не сказывается на росте затрат и насыщении параметра качества, а следовательно, и  $ТУ_0$ :

$$S = 0,5 \ln \left( \frac{1+x}{1-x} \right) = x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \dots$$

Для приведения формулы к задаче определения оптимального уровня качества необходимо выбрать единицу измерения параметра. Уровень качества мы измеряем в процентах. Тогда принципиальные пределы параметра легко определить. Принципиальный нижний предел — 100 % брака. Обозначим его буквой  $A$ . Принципиальный верхний предел — 0 % брака ( $B$ ). Очевидно, что все остальные параметры находятся в этих пределах. Пусть  $P$  — рассчитываемый показатель качества,  $D$  — предельно допустимый или базовый показатель. Тогда справедливо неравенство  $B < P < D < A$ . Чтобы определить положение параметра  $P$  на числовой оси в любой момент времени  $t$ , введем выражения:

$$x_1 = \frac{A-P}{P-B}, \quad x_2 = \frac{A-D}{D-B}, \quad x_1, x_2 \neq 0,$$

где  $\lim_{P \rightarrow B} (x_1, x_2) \rightarrow +\infty$ ;  $\lim_{P \rightarrow A} (x_1, x_2) \rightarrow 0$ .

Отношение  $x_1/x_2$  характеризует отклонение анализируемого (расчетного) уровня качества  $P$  от базового (допустимого)  $D$ .

Предварительная оценка экономической эффективности производства осуществляется по формуле  $\Theta_0 = (W_p \cdot TУ_p / TУ_0 \cdot W_0)$ , где  $TУ_p$ ,  $TУ_0$  — технические уровни расчетного и базового периода;  $W_p$ ,  $W_0$  — затраты в расчетный и базовый периоды. Планируемые затраты на поддержание заданного уровня качества и ТУ обобщенно рассчитываются по формуле  $W_p = k_6 \cdot S_p$ , где  $k_6 = W_0/S_0$  — базовый коэффициент,  $S_p$  — расчетная сложность производства,  $W_0$  — затраты на производство в базовом периоде,  $S_0$  — сложность производства в базовом периоде.

Таким образом, разработана методология и принципы расчета оптимального значения входного (заданного) уровня качества с учетом затрат. Получена возможность определять конкурентоспособность продукции сварочных работ и затраты на ее достижение.

**СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ И ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММАГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.** В. В. Колосов, А. Э. Капустин, В. К. Шелег (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защиты покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). Повышение требований к качеству сварных соединений в промышленности предопределяет рост требований к подготовке и аттестации специалистов по дефектоскопии. Поэтому подготовка высококвалифицированных специалистов по дефектоскопии является важным направлением в системе

управления качеством и рассчитана с учетом предела, до которого используется параметр качества. Математические модели оценки сложности  $S$  и ТУ приводят к общепринятым моделям для оценок затрат и ТУ, когда влияние пределов еще не сказывается на росте затрат и насыщении параметра качества, а следовательно, и  $ТУ_0$ :

$$S = 0,5 \ln \left( \frac{1+x}{1-x} \right) = x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \dots$$

Для приведения формулы к задаче определения оптимального уровня качества, необходимо выбрать единицу измерения параметра. Уровень качества мы измеряем в процентах. Тогда принципиальные пределы параметра легко определить. Принципиальный нижний предел — 100 % брака. Обозначим его буквой  $A$ . Принципиальный верхний предел — 0 % брака ( $B$ ). Очевидно, что все остальные параметры находятся в этих пределах. Пусть  $P$  — рассчитываемый показатель качества,  $D$  — предельно допустимый или базовый показатель. Тогда справедливо неравенство  $B < P < D < A$ . Чтобы определить положение параметра  $P$  на числовой оси в любой момент времени  $t$ , введем выражения:

$$x_1 = \frac{A-P}{P-B}, \quad x_2 = \frac{A-D}{D-B}, \quad x_1, x_2 \neq 0,$$

где  $\lim_{P \rightarrow B} (x_1, x_2) \rightarrow +\infty$ ;  $\lim_{P \rightarrow A} (x_1, x_2) \rightarrow 0$ .

Отношение  $x_1/x_2$  характеризует отклонение анализируемого (расчетного) уровня качества  $P$  от базового (допустимого)  $D$ .

Предварительная оценка экономической эффективности производства осуществляется по формуле  $\Theta_0 = (W_p \cdot TУ_p / TУ_0 \cdot W_0)$ , где  $TУ_p$ ,  $TУ_0$  — технические уровни расчетного и базового периода;  $W_p$ ,  $W_0$  — затраты в расчетный и базовый периоды. Планируемые затраты на поддержание заданного уровня качества и ТУ обобщенно рассчитываются по формуле  $W_p = k_6 \cdot S_p$ , где  $k_6 = W_0/S_0$  — базовый коэффициент,  $S_p$  — расчетная сложность производства,  $W_0$  — затраты на производство в базовом периоде,  $S_0$  — сложность производства в базовом периоде. Таким образом, разработана методология и принципы расчета оптимального значения входного (заданного) уровня качества с учетом затрат. Получена возможность определять конкурентоспособность продукции сварочных работ и затраты на ее достижение.

**СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ И ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-РАЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.** В. В. Колосов, А. Э. Капустин, В. К. Шелег (Науч.-исслед. и констр.-технолог. ин-т сварки и защиты покрытий с опыт. пр-вом, г. Минск, Республика Беларусь). Повышение требований к качеству сварных соединений в промышленности предопределяет рост требований к подготовке и аттестации специалистов по дефектоскопии. Поэтому подготовка высококвалифицированных специалистов по дефектоскопии является важным направлением в системе

управления качеством продукции в сварочном производстве. Сотрудниками Института сварки и защитных покрытий при тесном сотрудничестве с органом по сертификации «Профсертико» были рассмотрены пути совершенствования существующей системы подготовки и аттестации специалистов по радиационным методам контроля, в том числе с использованием ЭВМ, в результате чего было принято решение в рамках государственной научно-технической программы «Сварка» разработать в Научно-исследовательском институте сварки и защитных покрытий обучающий комплекс с оценкой профессиональной пригодности для подготовки специалистов рентгеновского и гаммаграфического контроля сварных соединений. Анализ нормативной документации, устанавливающей требования к квалификации персонала, осуществляющего неразрушающий контроль промышленной продукции, и системы его сертификации в странах ближнего зарубежья и европейских странах показал практически их полную схожесть друг с другом. В республике Беларусь таким стандартом является СТБ ЕН 473-95. Как показал анализ, количество информации для усвоения знаний и получения навыков достаточно велико, причем она в большинстве своем является труднодоступной и разобщенной. Использование электронного хранилища информации в ЭВМ — базы данных (БД) — дает в этом плане ряд преимуществ: во-первых, в БД может быть сконцентрирована в наиболее полном объеме вся необходимая информация, во-вторых, количество и содержание информации можно изменять в любой момент без особых усилий и затрат и, в третьих, значительно увеличивается скорость получения необходимых данных. Кроме теоретических навыков, дефектоскопист после обучения должен обладать и практическими: уметь настраивать оборудование, составлять технологические карты на просвечивание и расшифровывать рентгенограммы, что достигается обширной тренировкой учащихся. Но наиболее ответственный этап при проведении контроля — расшифровка и идентификация дефектов на рентгеновской пленке. Следует отметить, что в результате исследований восприятия человеческим глазом различных градиентов и перепадов серого (изображение, получаемое на рентгеновской пленке), проводимых в НИКТИ СП с ОП, было доказано, что дефектоскопистам свойственно ошибаться при определении как видов дефектов, так и их размеров. В результате исследований было также показано, что при соответствующей тренировке можно добиваться уменьшения процента брака. Подпрограмма-тренажер, реализующая данный способ тренировки, также включена в состав комплекса. Разработана программа, имитирующая процесс расшифровки снимков. Чтобы оценить знания прошедших курс обучения, в комплекс включены подпрограммы для проведения экзаменов. Согласно СТБ ЕН 473-95, тестируемый должен пройти квалификационный экзамен (общий балл должен быть не менее 80 %), который состоит из общего, специального и практического экзамена. Вопросы для каждого экзамена вводятся преподавателем, при проведении экзамена программа случайным образом отбирает их необходимое количество (количество вопросов указывается преподавателем). Подсчет баллов производится программой автоматически по формулам, описанным в СТБ ЕН 483-95.

of the Institute of Welding and Protective Coatings in close collaboration with the body of certification "Prof-sertiko" defined the ways of improving the existing systems of training and attestation of specialists on radiographic methods of control, including those using computer. As a result, the decision was taken within the scope of State Scientific-Technical Program "Welding" to develop at the above-mentioned Institute a training complex for assessment of a professional fitness for training of specialists of X-ray and gamma-ray control of the welded joints. Analysis of standardized documentation, which establishes requirements to the personnel qualification, dealing with NTD of industrial products, and systems of its certification in CIS and European countries showed almost complete their similarity. In Belarus this standard is STB EN 473-95. As analysis showed the amount of information for acquisition of knowledge and mastering habits is rather large, and in the most cases it is hard-to-learn and scattered. The use of the electronic storage of information in the computer, data base (DB), has a number of advantages: first, DB can concentrate all necessary information in the most complete volume, secondly, the amount and content of information can be changed in any moment without great efforts and expenses and, thirdly, the time of receiving the necessary data is significantly shortened. In addition to the theoretical knowledge, the specialist in flaw detection after training should gain practical habits: to set up equipment, to work out technological charts for X-ray examination and to decode roentgenograms that can be attained by a comprehensive training of specialists. However, the decoding and identification of defects in X-ray film is the most responsible stage. It should be noted that after examination of perception of different graduations and gradients of grey colour with a human eye (image obtained in X-ray film), carried out at the above Institute, it was proved that the specialists in flaw detection can make errors in determining the types of defects and their sizes. It was also shown by examinations that it is possible to decrease the percentage of rejection at a proper training. A subprogram, a simulator, which realizes this method of training, is also included into the complex of training. The program is developed for simulating the process of decoding the films.

To estimate knowledge of those who passed the course of training the subprograms for exams are included into the complex. In accordance with STB EN 473-95 the test person should pass a qualification exam (general estimate should not be less than 80%), which consists of a general, special and practical exam. Questions for each exam are entered by a teacher. During exam the program selects their necessary amount randomly (quantity of questions is indicated by a teacher). Calculation of estimates is made automatically by the program in accordance with the formulae described in STB EN 483-95.

**ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, МОНТАЖУ И ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ПЛАСТМАССОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.** В. С. Ромейко, В. Е. Бухин (Учебный центр НПО «Стройполимер», г. Москва, РФ). В последние 2-3 года на российском рынке трубной продукции для систем водоснабжения, водоотведения и отопления все отчетливее проявляют себя трубопроводы из полимерных материалов. Для проектирования, строительства и технического обслуживания таких трубопроводов необходимы технически грамотные специалисты, знающие особенности пластмассовых трубопроводов.

В соответствии с решением коллегии Госстроя России в Учебном центре НПО «Стройполимер» систематически осуществляется подготовка специалистов по следующим направлениям:

- проектирование систем водоснабжения, канализации и отопления из полимерных материалов;
- монтаж систем водоснабжения, канализации и отопления из полимерных материалов;
- монтаж тепловых сетей с заводской термоизоляцией из пенополиуретана и гидрозащитными покрытиями;
- проектирование тепловых сетей с заводской термоизоляцией из пенополиуретана и гидрозащитными покрытиями;
- технология, материалы и оборудование для восстановления и ремонта подземных трубопроводов без разрытия траншей способами «герметизация», «цементация», «труба в трубу», «чулок»;
- техническое обслуживание и прогрессивные технологии ремонта трубопроводов из полимерных материалов.

В Учебном центре проводится определенная работа по совершенствованию нормативной базы (участие в подготовке уточнений в существующие СНиПы и СП), по разработке методических материалов, программ. Центром подготовлен и издан ряд справочных материалов.

Организована система пропаганды прогрессивных технологий и материалов путем проведения региональных семинаров, научно-практических конференций, дней «открытых дверей», публикаций в периодической печати и издаваемом НПО «Стройполимер» журнале «Трубопроводы и экология», а также выступлений в средствах массовой информации.

Налажены творческие контакты с отечественными и зарубежными учебными центрами и курсами повышения квалификации, в том числе с фирмой «Полимербуд», г. Киев.

В Учебном центре собрано и классифицировано 85 технических видеофильмов и около 700 книг по основным разделам производства, монтажа и эксплуатации пластмассовых трубопроводов.

Считаем целесообразным координировать работу, проводимую в разных странах, по подготовке указанных специалистов.

**ПАТОНОВСКИЕ ТРАДИЦИИ ПРОФЕССИОНАЛИЗМА В СИСТЕМЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ.** А. А. Пыжикова (Гос. проф.-пед. колледж, г. Самара, РФ). Опираясь на давние традиции высокого профессионализма электросварочной школы, заложенные известным ученым-сварщиком Е. О. Патоном свыше десятилетий

**TRAINING OF SPECIALISTS ON DESIGNING, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF POLYMERIC PIPELINES.** V.S. Romeiko, V.E. Bukhin (Educational Center, NPO «Stroypolymer», Moscow, Russia). The pipelines of polymeric materials found a wide demand during recently at the Russian market of piping products for water supply, drain and heating systems. To design, construct and maintain these pipings the competent specialists are required who knows the peculiarities of polymeric pipes.

In accordance with a decision of collegium of Gosstroy of Russia the education and training of specialists on the following subjects is performed systematically at the Educational Center, NPO, Stroypolymer:

- designing of systems of water supply, sewerage and heating, manufactured from polymeric materials;
- assembly of polymeric systems of water supply, sewerage and heating;
- erection of heating systems with a factory thermoinsulation of foam polyurethane and hydroprotective coatings;
- technology, materials and equipment for restoration and repair of underground pipelines without opening of trenches using the «sealing», «cementation», «pipe-to-pipe», «stocking» methods;
- technical maintenance and advanced technologies of repair of polymeric pipelines.

The Educational Center carries out a definite work on improvement of a standardizing base (participation in preparation of amendments for the existing documentation), working out methodological materials, programs. Center prepared and published several handbooks.

A system of propaganda of advanced technologies and materials was organized by conductance of regional seminars, scientific-practical conferences, days of «open doors», publications in a periodic press and journal «Pipelines and ecology» issued by NPO «Stroypolymer», and by mass media means.

Relations have been established with domestic and foreign educational centres and courses of improving qualification including the company «Polymerbud» in Kiev. Educational Center has collected and classified 85 technical videofilms and about 700 books on main branches of production, erection and service of polymeric pipelines.

We think it rational to coordinate the work which is carried out in different countries on education and training of the mentioned specialists.

**PATON'S TRADITIONS OF A PROFESSIONALISM IN THE SYSTEM OF A PROFESSIONAL EDUCATION IN RUSSIA.** Pyzhikova A.A. (State Professional-Pedagogical College, Samara, Russia). Coming from long-established traditions of high professionalism of the Electric Welding School based by E.O. Paton, the well-known scientist-welder, more than six decades ago, the staff

тому назад, коллектив Самарского государственного профессионально-педагогического колледжа поставил перед собой задачу повышения качества подготовки специалистов через создание условий, способствующих саморазвитию и профессиональному самосовершенствованию будущих специалистов.

Разработанная и реализованная на базе колледжа многоуровневая подготовка мастера производственного обучения предусматривает параллельное синхронизированное обучение теорией и практикой, обуславливающее высокую успеваемость и большой интерес к учебе; наличие научной школы и традиций в системе образования; совместную творческую и практическую деятельность преподавателей и студентов; широкое привлечение к преподаванию деятелей науки, культуры, искусств; установление связей между учебными заведениями, научными центрами, производственными предприятиями; создание информационной системы образования, обеспечивающей доступ к новейшей научно-технической и научно-педагогической информации.

Самарский государственный профессионально-педагогический колледж, благодаря поддержке академика Б. Е. Патона, опираясь на разработки Института электросварки им. Е. О. Патона, с которым заключено многоаспектное соглашение о сотрудничестве в интересах подготовки кадров, получил дальнейшее развитие, став центром непрерывного профессионального образования и экспериментальной научно-педагогической площадкой Министерства образования РФ.

Патоновские традиции профессионализма в системе профессионального образования доказали свою жизнеспособность и стали традиционными в коллективах учебных заведений России.

of Samara State Professional-Pedagogical College put forward the task of improving the quality of education of specialists by the creation of conditions promoting self-education and self-perfection of future specialists. A multilevel education of skilled specialists of industrial training, developed and realized on the base of College envisages a parallel synchronous teaching a theory and practice which provides a high progress and a great interest to education; presence of a scientific school and traditions in the educational system; joint creative and practical activity of teachers and students; inviting of distinguished representatives of science, culture and art for teaching; establishing relations between educational institutions, research centers, industrial enterprises; creation of information system of education which gives access to the newest research and pedagogical information.

Samara State Professional-Pedagogical College, thanks to support of academician B.E.Paton and using the developments of the E.O.Paton Electric Welding Institute, with which a multiaspect agreement about cooperation in the interests of education of specialist was signed, became a center of a permanent professional education and experimental research-pedagogical grounds of Ministry of Education of Russia.

Paton's traditions of professionalism in the system of a professional education proved their vitality and became traditional in the educational institutions of Russia.

# СОДЕРЖАНИЕ

## СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

<b>В. В. Аладинский, В. О. Маханев, В. Л. Мельников.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ .....	5
<b>А. М. Апасов.</b> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПО СИГНАЛАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ .....	6
<b>А. М. Апасов.</b> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ .....	6
<b>Н. Н. Воронин, Н. Н. Воронин, В. Г. Павлов, Д. Г. Эфрос.</b> РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ПЯТНИКОВОГО УЗЛА ВАГОНА, ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПЛАВКОЙ .....	6
<b>А. А. Гейзер.</b> УНИВЕРСАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	8
<b>С. В. Денбновецкий, В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, А. В. Лецишин, С.Р. Михайлов.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ .....	9
<b>В. В. Дмитрик.</b> К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СВЫШЕ 200 000 Ч .....	10
<b>А. А. Дубов, В. И. Загребельный, А. В. Мозговой, А. Н. Рудаков.</b> ДИАГНОСТИКА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ .....	11
<b>А. Н. Козин, Е. А. Давыдов, В.А. Троицкий.</b> УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ТИПА, МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ .....	12
<b>В. Кошовий, З. Назарчук, Є. Кривін, І. Романишин, А. Гудко, В. Курій.</b> УЛЬТРАЗВУКОВА КОМП'ЮТЕРНА ТОМОГРАФІЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	13
<b>Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, И.В. Киянец, Е. М. Олейник.</b> НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ .....	14
<b>Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, П. Д. Кротенко, Е. М. Олейник.</b> АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН ПОЛОС ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ .....	14
<b>Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Г. И. Ткачук, В. Г. Юрченко, В.Н.Шишкин.</b> НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ СБОРКИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ .....	15
<b>В. Л. Найда, В. А. Филиппенков, В. В. Гетьман, В. М. Пышный, В. М. Тороп.</b> КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ АУЗК СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ .....	16
<b>В. Л. Найда, В. А. Филиппенков, А. С. Ковбасенко, О. Ф. Лобанов, В. А. Чиженко, А. А. Мозжухин, В. М. Пышный.</b> ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИЗЭС-ЭАКС ПО МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МАТЕРИАЛОВ .....	17
<b>А. Я. Недосека, М. А. Яременко.</b> КОМПЛЕКСНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ .....	19
<b>М. Р. Нургужин, Т. Я. Кацага.</b> ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ПК ANWELD) .....	20
<b>В. П. Радько, В. А. Троицкий.</b> ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ ШВАХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКА .....	21
<b>В. П. Радько, В. А. Троицкий.</b> УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ .....	22

<b>В. А. Троицкий.</b> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ .....	23
<b>В. А. Филиппенков, В. Л. Найда, В. А. Троицкий, В. М. Пышный.</b> О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ «РЕАНИМАЦИИ» В УКРАИНЕ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОРАДИОГРАФИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ ШВОВ И МАТЕРИАЛОВ .....	23
<b>Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа, Р. Н. Калугин.</b> РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ .....	25
<b>И. Я. Шевченко, В. А. Троицкий, П. В. Федоряка.</b> ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ .....	26
<b>А. Л. Шекеро, В. А. Троицкий.</b> ПОВЫШЕНИЕ ОБЪЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПУТЕМ КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО ПРОЦЕССА .....	27
<b>А. Л. Шекеро.</b> РАЗРАБОТКА СПОСОБА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ НЕПРОВАРОМ .....	28

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

<b>И. М. Альтер, Е. П. Воевода.</b> ДЕФОРМАЦИИ И РЕАКТИВНЫЕ МОМЕНТЫ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ШАХТНЫХ КРЕПЕЙ .....	33
<b>И. М. Альтер, Е. П. Воевода, Г. Х. Насыров.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРООБРАБОТКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ШАХТНЫХ КРЕПЕЙ ...	33
<b>Ю. П. Байшев, Н. И. Дробышевский, А. С. Филиппов.</b> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РУЧНОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСА ....	34
<b>Ю. П. Байшев, В. И. Наседкин.</b> РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСА .....	35
<b>О. І. Балицький, О. О. Крохмальний, І. Ф. Костюк.</b> КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОАЗОТНИХ СТАЛЕЙ .....	37
<b>А. В. Баранов, Л. В. Ильин, В. П. Леонов.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПРОЦЕДУР ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ .....	37
<b>В. А. Бондаренко, Г. Е. Филатов.</b> УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ .....	38
<b>Я. Й. Бурак, О.Р.Гачкевич, С.Ф.Будз, В.І.Асташкін, Є.М.Ірза.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА НАПРУЖЕННЯМИ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	39
<b>Я. Бурак, Ю. Зозуляк, Ю. Ледяшов, В. Новацький, В. Санченко.</b> ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ .....	40
<b>Э.Ф. Гарф, Э. М. Дыскин, А. Е. Литвиненко.</b> ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБЧАТЫХ УЗЛОВ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКОЙ .....	41
<b>А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур.</b> ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВО- ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ .....	42
<b>М. И. Казакевич, Д. О. Банников.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СТАЛЬНЫХ БУНКЕРОВ .....	42
<b>В. С. Казарновский, Л. С. Васильева.</b> РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБЧАТЫХ ПРОФИЛЕЙ .....	43
<b>В. Н. Кальянов, В. А. Багров.</b> ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАПЛАВЛЯЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ .....	45
<b>В. М. Кулик, М. М. Савицкий, Д. П. Новікова, В. Г. Васильев, Г. М. Гордань.</b> АРГОНО-ДУГОВА ОБРОБКА БЕЗ ПІДПЛАВЛЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СХИЛЬНИХ ДО ЗАГАРТУВАННЯ СТАЛЕЙ .....	46

<b>Т. М. Лабур, А. Я. Ищенко.</b> ВЛИЯНИЕ НЕИЗБЕЖНЫХ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ .....	47
<b>Э.В. Лазарсон.</b> ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ К ВОПРОСАМ СВАРКИ .....	47
<b>В. К. Лебедев, Ю. Д. Яворский, П. А. Щепетинов.</b> ПРОКАТНО-СВАРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ТРАНСПОРТНЫХ И ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТАХ .....	49
<b>Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, Н. А. Пашин, В. В. Лысак.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УПРУГОГО РАСТЯЖЕНИЯ СВАРНОЙ СТРИНГЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СПЛАВА АМг6НП НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ .....	49
<b>Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. И. Киянец, Е. М. Олейник.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТР-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ .....	50
<b>Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко, С. Г. Андрущенко, В. Г. Тульчинский, А. Г. Ковнеристов.</b> КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ОТВЕРСТИЙ В СОЧЕТАНИИ С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЕЙ .....	51
<b>Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко, В. Н. Чехов, К. А. Королев.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ .....	51
<b>Л. И. Миходуй, В. Д. Позняков, О. Л. Миходуй.</b> ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА .....	52
<b>М.Р. Нургужин, Г. Т. Даненова.</b> МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ .....	53
<b>В. А. Осадчук, І. Б. Назар.</b> РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ .....	54
<b>В. М. Палаш, В. М. Юськів, А. Р. Дзюбик.</b> МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ .....	56
<b>Н. І. Поліщук.</b> ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМУВАННИМ СТАНОМ ІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З ЗАЛИШКОВИМИ ДЕФОРМАЦІЯМИ .....	57
<b>В. І. Похмурський, О. С. Калахан.</b> ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЗМІНУ ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ І КОРОЗІЙНУ ВТОМУ ( $\alpha+\beta$ )-СПЛАВУ ТИТАНУ .....	58
<b>А. Н. Серенко.</b> КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	59
<b>А. Х. Смирнов.</b> МЕХАНО-КОРРОЗИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ СООРУЖЕНИЙ .....	60
<b>Д. А. Троценко, А. Е. Гончаров, В. И. Копырин, В. К. Сидоров, Б. Ф. Калашников.</b> ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ГИБКИХ УПОРОВ ДЛЯ МОСТОСТРОЕНИЯ .....	61
<b>Х.Тубилевич, Р. Мелехов.</b> КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ И МКК СВАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ТИПА 18-10 .....	63
<b>В. Ф. Чекурін, О. З. Кравчишин.</b> ОБЕРНЕНА ЗАДАЧА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ГАРТУВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ У ЛИСТАХ .....	64
<b>О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, В. М. Михайлишин, О. С. Письменный.</b> РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	64
<b>В. В. Широков.</b> ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ ОКРИХЧЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПАЯНИХ СОТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....	65

<b>Б. С. Шульгинов, В. А. Дегтярев, В. В. Матвеев.</b> МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА .....	66
<b>В. Н. Шимановский, В. Н. Гордеев.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ .....	67
<b>В. П. Королев, Р. Г. Толстяков.</b> ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ В РАСЧЕТАХ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ .....	68
<b>В. И. Столбов.</b> СНИЖЕНИЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ .....	68
<b>А. И. Гедрович, А. Б. Жидков.</b> СВАРКА ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ .....	69
<b>В. Ю. Атаев, А. А. Мухаммедов, М. А. Абралов.</b> ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПАРОПРОВОДНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 15Х1М1Ф ПУТЕМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ .....	70
<b>А. Ю. Бондаренко.</b> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ОТВЕТСТВЕННЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	71

### **ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, ПАЙКИ, РЕЗКИ И НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ**

<b>А. М. Апасов.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ДЕФЕКТЫ СТРОЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ .....	75
<b>А. М. Апасов, Э. В. Козлов.</b> СТРУКТУРА СВАРНОГО ШВА АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ .....	75
<b>А. М. Апасов.</b> МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ .....	76
<b>Б. Н. Бадьянов.</b> НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	77
<b>В. П. Березиенко, Ф. Г. Ловшенко.</b> РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ .....	78
<b>Н. Ю. Борд, В. А. Артюхов, О. Ф. Минченко.</b> ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЛИГАТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ КАРБЮРИЗАТОРОВ .....	80
<b>Н. Ю. Борд, В. А. Артюхов, О. Ф. Минченко.</b> ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА СПОСОБАМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ....	81
<b>Л. Г. Ворошнин, Л. А. Антошина.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОРОШКА ЦИНКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ .....	82
<b>Е. Д. Гавриленко.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ УГЛОВЫХ ШВОВ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ ОБЪЕМНЫХ СУДОКОРПУСНЫХ СЕКЦИЙ .....	83
<b>Е. Д. Гавриленко, С. М. Самохин, Ю. В. Солониченко.</b> ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ НА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ВЕРФЯХ УКРАИНЫ .....	84
<b>А. А. Гейзер.</b> ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....	85
<b>В. В. Головки.</b> СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ .....	86
<b>В. Ф. Демченко, О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий, С. С. Козлитина.</b> РАСЧЕТНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГИГИЕНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ .....	88
<b>В. В. Дмитрик, А. Н. Пашенко.</b> РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАБРЫЗГИВАНИЯ СОПЛ ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ .....	89
<b>С. В. Драган, Е. Д. Гавриленко, Ю. В. Солониченко.</b> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ РТК ПРИ СВАРКЕ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	90
<b>М. Л. Жадкевич.</b> ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ И РАЗУПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	91

<b>К. И. Зайцев.</b> СТРОИТЕЛЬСТВО ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ БИПЛАСТМАССОВЫХ ТРУБ .....	92
<b>А. Я. Ищенко, А. А. Бондарев, Андр. А. Бондарев.</b> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ СТРИНГЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	93
<b>А. Я. Ищенко, В. Ф. Демченко, В. П. Будник, С. С. Козлитина.</b> ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ .....	94
<b>Е. Н. Каблов, В. И. Лукин, Л. И. Сорокин.</b> СВАРИВАЕМОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ .....	95
<b>Д. М. Калеко.</b> ДУГОКОНТАКТНАЯ ПРИВАРКА ДЮБЕЛЕЙ .....	97
<b>О. Е. Капустин.</b> НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, А ТАКЖЕ СИСТЕМ ГАЗОПИТАНИЯ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ .....	97
<b>В.И. Колосов, П. А. Гореликов, Р. А. Мусин.</b> ВЛИЯНИЕ УСИЛИЯ СЖАТИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОЙ ТОЧКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ .....	98
<b>А. Н. Корниенко, Н. А. Макаренко.</b> РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ СЖАТОЙ ДУГОЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЗАГОТОВОК С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ТЕПЛОВОДОМ .....	99
<b>П. М. Корольков.</b> СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ МЕСТНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ .....	100
<b>А. Е. Коротынский.</b> ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЦИКЛОКОНВЕРТОРОВ .....	101
<b>О. Г. Кузьменко.</b> УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ И СТРУКТУРОЙ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ НЕКОМПАКТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ .....	102
<b>Ю. Г. Куцан, М. Л. Жадкевич.</b> РЕШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	103
<b>С. И. Кучук-Яценко, Л. И. Маркашова, П. Н. Четверо, Е. Н. Бердникова, И. Н. Мосендз, А. В. Бондарук.</b> СТРУКТУРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ РАЗНОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ .....	104
<b>В. А. Лебедев, В. Г. Пичак.</b> ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ДУГОВОЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ .....	105
<b>Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. В. Арсенюк.</b> СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ .....	106
<b>Л. И. Маркашова, Л. С. Киреев.</b> СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОНЫ КОНТАКТА ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ ПОРИСТО-МОНОЛИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ Ti-N .....	107
<b>В. В. Милуков, К. В. Иванов-Польский.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА ПРИ ЗАДАННЫХ ФРОНТАХ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ .....	108
<b>В. М. Мозок, А. Е. Коротынский.</b> МЕХАНИЗИРОВАННАЯ СВАРКА В РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ .....	109
<b>Н. В. Новик.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ КОНТАКТНО-СТЫКОВОЙ СВАРКЕ .....	110
<b>А. С. Павлов, В. И. Захаров.</b> ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ГИДРОЦИЛИНДРОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В ТЕРМОУПРОЧНЕННОМ СОСТОЯНИИ .....	111
<b>Н. И. Пинчук, В. А. Матвеев.</b> ОПЫТ РЕМОНТНОЙ СВАРКИ НА ЛОПАТКАХ ТУРБИН ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ .....	112
<b>С. П. Рагунович, В. К. Шелег, В. А. Цыганов.</b> СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НИЗКОАМПЕРНОЙ СЖАТОЙ ДУГОЙ .....	114
<b>А. А. Радченко.</b> ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕХНОЛОГИЮ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ И ИХ СВОЙСТВА .....	115

<b>М. В. Радченко, В. Г. Радченко, Ю. О. Шевцов.</b> ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАПАДНО-СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ .....	116
<b>Н. Г. Ремпе, Л. А. Волков, Р. Д. Пчелкин.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	117
<b>Н. Г. Ремпе, А. А. Кислицкий, Н. В. Онучин.</b> СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОТОЧНОГО СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	118
<b>Н. Г. Ремпе, И. В. Осипов, О. Е. Троян.</b> ПУШКА С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ .....	119
<b>И. Л. Ровенский, Н. И. Пинчук.</b> НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ РОТОРОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ .....	120
<b>А. И. Рожков, А. А. Радченко.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТАМПОВ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКИ .....	122
<b>Е. Н. Румянцев, В. О. Токарев.</b> ВЫБОР АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭЛС .....	123
<b>В. Р. Рябов, А. Г. Ясинский.</b> СВАРКА КОМПОЗИЦИОННОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МАГНИЯ .....	124
<b>С. М. Самохін.</b> ФІЗИКО-МЕТАЛУРГІЙНА СУМІСНІСТЬ І ЗАКОНОМІРНОСТІ ВЗАМОДІЇ РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ ПРИ ПАЯННІ .....	124
<b>С. Б. Сапожков, К. И. Томас, В.Т. Федько.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БРЫЗГ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ СВАРИВАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ .....	126
<b>Ю. Н. Сараев, О. И. Шпигунова.</b> АЛГОРИТМЫ ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДОВ .....	127
<b>Б. Ф. Советченко, И. О. Хазанов, Н. А. Азаров.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК МЕТЧИКОВ .....	129
<b>Б. П. Татарин, В.Ю. Мастенко.</b> ВИКОРИСТАННЯ ДВОЕЛЕКТРОДНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПІД ФЛЮСОМ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	129
<b>В. О. Токарев, Е.Н. Румянцев.</b> ЗАЩИТА КАТОДНОГО УЗЛА СВАРОЧНОЙ ПУШКИ ПРИ ЭЛС В НИЗКОМ ВАКУУМЕ .....	130
<b>К. И. Томас, С. Б. Сапожков, В. Т. Федько.</b> СОСТАВ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ СВАРИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ОТ БРЫЗГ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ .....	131
<b>Ю. Фуджита, Ю. Манабе, С. Зенитани, С.Уракава.</b> РАЗРАБОТКА ДВУХЭЛЕКТРОДНОЙ СВАРКИ TIG С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ РАСПЛАВЛЕННОЙ ВАННОЙ .....	132
<b>В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова, И. В. Зволинский, М. С. Самохин.</b> ПАЙКА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУГОВОГО НАГРЕВА .....	133
<b>В.Ф. Хорунов, О. М. Сабадаш, В. С. Кучук-Яценко.</b> ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ АЛЮМИНИЯ СО СТАЛЬЮ .....	134
<b>В. А. Цыганов, С. П. Рагунович, С. П. Торпачев.</b> УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГИ .....	136
<b>В. А. Цыганов, А. Г. Тимонович.</b> СТАБИЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА В ПОЛЕ УЛЬТРАЗВУКА .....	137
<b>Я. П. Черняк.</b> ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОШЕННЫХ ТРАМВАЙНЫХ РЕЛЬСОВ .....	138
<b>В. В. Чигарев, К. А. Кондрашов.</b> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМА-МИГ НАПЛАВКИ .....	139

<b>А. А. Шульженко, С. А. Клименко, Ю. А. Муковоз.</b> ОБРАБОТКА ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАПЫЛЕНИЕМ И НАПЛАВКОЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	140
<b>Ю. Д. Щицын, Ю. М. Тыткин, В. Ю. Щицын, О. А. Косолапов.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ .....	141
<b>К. А. Ющенко, А. А. Бондарев, Т. М. Старушенко, В. Н. Радзиевский, Г. М. Шеленков.</b> ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНО-ПАЯНЫХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ .....	142
<b>К. А. Ющенко, Д. В. Коваленко, И. В. Коваленко, В. А. Пестов.</b> СВАРКА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ .....	143
<b>К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. А. Наконечный.</b> ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	144
<b>В. С. Рыльников, А. П. Шатов, В. И. Царев.</b> ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ГТД .....	144
<b>М. Н. Сивцев, О. И. Слепцов.</b> РАЗРАБОТКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР .....	145
<b>Н. Г. Ефименко.</b> КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИТТРИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	146

#### **СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ**

<b>Л. С. Денисов.</b> ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В СИСТЕМАХ КАЧЕСТВА, АДАПТИРОВАННЫЕ К ТРЕБОВАНИЯМ ИСО-9000 .....	151
<b>Л. С. Денисов.</b> СЕРТИФИКАЦИЯ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ .....	152
<b>Л. С. Денисов, П. В. Занковец.</b> ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ, ЗАТРАТЫ НА КАЧЕСТВО И ДОСТИЖЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ .....	153
<b>В. В. Колосов, А. Э. Капустин, В. К. Шелег.</b> СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ И ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММАГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	154
<b>В. С. Ромейко, В. Е. Бухин.</b> ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, МОНТАЖУ И ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ПЛАСТМАССОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ .....	156
<b>А. А. Пыжикова.</b> ПАТОНОВСКИЕ ТРАДИЦИИ ПРОФЕССИОНАЛИЗМА В СИСТЕМЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ .....	156

# CONTENTS

## WELDED STRUCTURES, STRENGTH OF WELDED JOINTS

<b>V.V.Aladinsky, V.O.Makhanov, V.L.Melnikov.</b> SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE IN STUDY OF SUSCEPTIBILITY OF WELDED JOINTS OF STABILIZED STAINLESS STEEL PIPELINES TO CRACKING .....	5
<b>A.M.Apasov.</b> DEVICE FOR DETERMINATION OF COORDINATES OF DEFECTS IN WELDED JOINTS BY THE ACOUSTIC EMISSION SIGNALS .....	6
<b>A.M.Apasov.</b> DEVICE FOR RECEIVING THE ACOUSTIC EMISSION SIGNALS .....	6
<b>N.N.Voronin, N.N. Voronin, V.G.Pavlov, D.G.Efros.</b> CALCULATED DETERMINATION OF SERVICE LIFE OF A RAILWAY CAR PIVOT JUNCTION REPAIRED BY SURFACING .....	6
<b>A.A.Geizer.</b> VERSATILE DEVICE FOR ELECTROMAGNETIC CONTROL OF WELDED STRUCTURES .....	8
<b>S.V.Denbnovetsky, V.A.Troitsky, N.G.Beliy, A.V.Leshchishin, S.R. Mikhailov.</b> INCREASE IN SENSITIVITY OF X-RAY TV CONTROL .....	9
<b>V.V.Dmitrik.</b> ABOUT THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF INCREASING THE SERVICE LIFE OF POWER EQUIPMENT WELDED JOINTS ABOVE 20000 HOURS .....	10
<b>A.A.Dubov, V.I.Zagrebelny, A.V.Mozgovoy, A.N.Rudakov.</b> DIAGNOSTICS OF STEEL STRUCTURES USING THE METHOD OF A MAGNETIC MEMORY .....	11
<b>A.N.Kozin, E.A.Davydov, V.A.Troitsky.</b> ULTRASONIC TESTING OF WELDS OF MAIN PIPELINES WITH AN IDENTIFICATION OF TYPE, LOCATION AND SIZE OF DEFECTS .....	12
<b>V.Koshevoy, Z.Nazarchuk, E.Kravin, I.Romanishin, A.Gudko, V.Kuriy.</b> ULTRASONIC COMPUTER TOMOGRAPHY OF WELDED STRUCTURES .....	13
<b>L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, I.V.Kiyanets, E.M.Oleinik.</b> NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF COMPOSITE PIPES USING THE METHOD OF ELECTRON SHEAROGRAPHY ....	14
<b>L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, V.V.Savitsky, P.D.Krotenko, E.M.Oleinik.</b> AUTOMATIC COMPUTER ANALYSIS OF HOLOGRAPHIC INTERFERENCE FRINGE PATTERNS IN NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF MATERIALS AND STRUCTURES .....	14
<b>L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, G.I.Tkachuk, V.G.Yurchenko, V.N.Shishkin.</b> NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF ASSEMBLY ELEMENTS OF A SPACING GRID USING THE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY .....	15
<b>V.L.Naida, V.A.Filippenkov, V.V.Getman, V.M.Pishnyi, V.M.Torop.</b> INTEGRATED APPROACH IN DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF PIPELINES AT AUTOMATED UT OF BUTT WELDS .....	16
<b>V.L.Naida, V.A.Filippenkov, A.S.Kovbasenko, O.F.Lobanov, V.A. Chizhenko, A.A. Mozhukhin, V.M. Pyshyi.</b> CHALLENGING DEVELOPMENTS OF THE PATON INSTITUTE AND EACS ON MECHANIZATION AND AUTOMATION OF NDT OF WELDED JOINTS AND MATERIALS .....	17
<b>A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko.</b> INTEGRATED DIAGNOSTICS OF MAIN GAS PIPELINES .....	19
<b>M.R. Nurguzhin, T.Ya. Katsaga.</b> ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE USING A PROGRAMMING COMPLEX PC ANWELD FOR PREDICTION OF LIFE OF WELDED STRUCTURES .....	20
<b>V.P.Radko, V.A.Troitsky.</b> DETECTION AND LOCALIZING OF DEFECTS IN PLASTIC WELDMENTS USING AN ULTRASOUND .....	21
<b>V.P.Radko, V.A.Troitsky.</b> ULTRASONIC QUALITY CONTROL OF JOINTS MADE BY THE AUTOMATIC FLASH-BUTT WELDING .....	22
<b>V.A.Troitsky.</b> PROSPECTS OF APPLICATION OF COMPUTERIZED ULTRASONIC FLAW DETECTORS .....	23
<b>V.A.Filippenkov, V.L.Naida, V.A.Troitsky, V.M.Pyshnyi.</b> ABOUT REHABILITATION OF WORKS ON ELECTORADIOGRAPHIC CONTROL OF WELDS AND MATERIALS IN UKRAINE .....	23
<b>F.A.Khromchenko, V.A.Lappa, R.N.Kalugin.</b> SERVICE LIFE AND DIAGNOSTICS OF WELDED JOINTS OF STEAM PIPELINES .....	25

<b>I.Ya.Shevchenko, V.A.Troitsky, P.V.Fedoryaka.</b> PECULIARITIES OF ULTRASONIC TESTING OF WELDED JOINTS IN PIPES OF GAS AND OIL PIPELINES DURING THEIR PRODUCTION .....	26
<b>A.L.Shekero, V.A.Troitsky.</b> IMPROVEMENT IN OBJECTIVITY OF RESULTS OF CERTIFICATION OF NDT SPECIALISTS BY COMPUTERIZING THE EXAMINING PROCEDURE .....	27
<b>A.L.Shekero.</b> DEVELOPMENT OF A METHOD OF UT OF WELDED JOINTS WITH A TECHNOLOGICAL LACK OF PENETRATION .....	28

## QUALITY CONTROL, TECHNICAL DIAGNOSTICS AND EVALUATION OF RESIDUAL LIFE OF WELDED STRUCTURES

<b>I.M.Alter, E.P.Voevoda, V. G. Kh. Nasyrov.</b> DEFORMATIONS AND REACTIVE MOMENTS IN WELDED STRUCTURES OF MINE SUPPORTS .....	33
<b>I.M.Alter, E.P.Voevoda, N. I. Drobyshevsky.</b> APPLICATION OF VIBRO-TREATMENT FOR DECREASE OF THE RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURES OF MINE SUPPORTS .....	33
<b>Yu.P.Baishev.</b> NUMERICAL INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES AND DEFORMATIONS IN MANUAL AND AUTOMATIC WELDING OF SHEET STRUCTURES OF A BLAST FURNACE COMPLEX .....	34
<b>Yu.P.Baishev, V.I.Nasedkin.</b> ESTIMATION OF RELIABILITY CHARACTERISTICS OF SHEET STRUCTURES OF A BLAST COMPLEX .....	35
<b>O.I.Balitsky, O.O.Krokhmalny, I.F.Kostyuk.</b> CORROSION-MECHANICAL STRENGTH OF WELDED JOINTS OF HIGH- NITROGEN STEELS .....	37
<b>A.V.Baranov, A.V.Ilyin, V.P.Leonov.</b> IMPROVEMENT OF CALCULATION PROCEDURES FOR EVALUATING THE LIFE OF WELDED JOINTS OF STRUCTURES OF DRILLING PLATFORMS USING SIMULATION OF PROCESSES OF CYCLIC FRACTURE .....	37
<b>V.A.Bondarenko, G.E.Filatov.</b> CONTROL OF FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN ELECTRIC ARC SURFACING .....	38
<b>Ya.Burak, O.R.Gachkevich, S.F.Budz, V.I.Astashkin, E.M.Irza.</b> OPTIMIZING THE CONDITIONS OF WELDING THE GLASS STRUCTURE ELEMENTS IN TERMS OF STRESSES .....	39
<b>Ya.Burak, Yu.Zozulyak, Yu.Ledyashov, V. Novatsky, V.Sanchenko.</b> FUNDAMENTALS OF OPTIMISING RESIDUAL STRESSES IN THE TECHNOLOGY OF WELDING THIN-WALLED ELEMENTS OF STRUCTURES .....	40
<b>E.F.Garf, E.M.Dyskin, A.E.Litvinenko.</b> ASSESSMENT OF FATIGUE LIFE OF TUBULAR CONNECTIONS AFTER ULTRASONIC PEENING TREATMENT .....	41
<b>A.Ya.Ishchenko, T.M.Labur.</b> CHARACTERISTICS OF STENGTH AND FRACTURE RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF PROMISING ALUMINIUM-LITHIUM ALLOYS .....	42
<b>M.I.Kazakevich, D.O.Bannikov.</b> UPGRADING OF DESIGNS OF STEEL HOPPERS .....	42
<b>V.S.Kazarnovsky, L.S.Vasiljeva.</b> CALCULATION ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES OF WELDED JOINTS OF TUBULAR SECTIONS .....	43
<b>V.N.Kalianov, V.A.Bagrov.</b> INCREASE IN RELIABILITY AND FATIGUE LIFE OF AS-SURFACED PRODUCTS .....	45
<b>V.M.Kulik, M.M.Savitsky, D.P.Novikova, V.G.Vasilyev, G.M.Gordan.</b> ARGON-ARC TREATMENT WITHOUT PARTIAL MELTING OF WELDED JOINTS MADE OF QUENCHING STEELS .....	46
<b>T.M.Labur, A.Ya.Ishchenko.</b> EFFECT OF INEVITABLE INNER DEFECTS ON THE FRACTURE RESISTANCE OF HIGH- STRENGTH ALUMINIUM ALLOY WELDED JOINTS .....	47
<b>E.V.Lazarson.</b> APPLICATION OF THE FUZZY-SET THEORY TO THE PROBLEMS OF WELDING .....	47
<b>V.K.Lebedev, Yu.D.Yavorsky, P.A.Shchepetinov.</b> ROLLED-WELDED ELEMENTS FOR WATER-ENGINEERING WORKS IN TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL FACILITIES .....	49
<b>L.M.Lobanov, V.I.Pavlovsky, N.A.Pashchin, V.V.Lysak.</b> INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELASTIC PRETENSION OF A WELDED STRINGER SHELL OF AMg6NPP ALLOY ON ITS STRESS-STRAIN STATE .....	49

<b>L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, V.I. Kiyanets, E.M.Oleynik.</b> DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN ELEMENTS OF MACHINE-BUILDING STRUCTURES USING THE METHOD OF ELECTRON SPECKLE-INTERFEROMETRY .....	50
<b>L.M.Lobanov, V.A..Pivtorak, P.D.Krotenko, S.G.Andrushchenko, V.G.Tulchinsky, A.G.Kovneristov.</b> COMPUTER SYSTEM FOR DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY THE METHOD OF HOLES IN COMBINATION WITH A HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY .....	51
<b>L.M.Lobanov, V.A..Pivtorak, P.D.Krotenko, V.N.Chekhov, K.A.Korolyev.</b> MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES USING THREE-DIMENSIONAL SOLUTIONS OF PROBLEMS OF THE THEORY OF ELASTICITY .....	51
<b>L.I.Mikhodui, V.D.Poznyakov, O.L.Mikhodui.</b> FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS OF HIGH- STRENGTH STEEL USING PREHEATING .....	52
<b>M.R.Nurguzhin, G.T.Danenova.</b> METHODS OF AUTOMATED CALCULATION OF CRITERIAL CHARACTERISTICS OF FRACTURE MECHANICS .....	53
<b>V.A.Osadchuk, I.B.Nazar.</b> CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD OF DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURE WELDED ELEMENTS .....	54
<b>V.M.Palash, V.M.Yuskiv, A.R.Dzyubik.</b> METHOD OF DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN MAIN PIPELINES .....	56
<b>N.I.Polishchuk.</b> FUNDAMENTALS OF OPTIMUM CONTROL OF STRESS-STRAIN STATE OF ISOTROPIC CYLINDRICAL SHELLS WITH RESIDUAL STRAINS .....	57
<b>V.I.Pokhmursky, O.S.Kalakhan.</b> EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CHANGES IN RESIDUAL WELDING STRESSES AND CORROSION FATIGUE OF ( $\alpha+\beta$ ) TITANIUM ALLOY .....	58
<b>A.N.Serenko.</b> COMPUTER SYSTEM OF DESIGN-TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF WELDED STRUCTURES .....	59
<b>A.Kh.Smirnov.</b> MECHANICAL-CORROSION RELIABILITY AND FATIGUE LIFE OF WELDED STEEL ELEMENTS AND MEMBERS OF LOAD-CARRYING STRUCTURES OF OFF-SHORE OIL AND GAS PRODUCTION CONSTRUCTIONS .....	60
<b>D.A.Trotsenko, A.E.Goncharov, V.I. Kopyrin, V.K.Sidorov, V.F.Kalashnikov.</b> CYCLIC LIFE OF FLEXIBLE ROD STOPS FOR BRIDGE CONSTRUCTION .....	61
<b>Kh.Tubilevich, R.Melekhov.</b> CORROSION CRACKING AND INTERCRYSTALLINE CORROSION OF WELDED EQUIPMENT MANUFACTURED FROM AUSTENITIC STEEL OF 18-10 TYPE .....	63
<b>V.F.Chekurin, O.Z.Kravchishin.</b> INVERSE PROBLEM OF ULTRASONIC CONTROL OF HARDENING STRESSES IN SHEETS .....	64
<b>O.M.Shablui, Ch.V.Pulka, V.M.Mikhailishin.</b> CONTROL OF RESIDUAL DISPLACEMENTS IN INDUCTION SURFACING OF THIN METAL STRUCTURES .....	64
<b>V.V.Shirokov.</b> HIGH-TEMPERATURE EMBRITTLEMENT OF WELDED STRUCTURES MADE OF BRAZED HONEYCOMB ELEMENTS .....	65
<b>B.S.Shulginov, V.A.Degtyarev, V.V.Matveev.</b> METHODS OF IMPROVEMENT OF FATIGUE RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF METAL STRUCTURES USED UNDER THE CONDITIONS OF EXTREME NORTH .....	66
<b>V.N.Shimanovsky, V.N.Gordeev.</b> IMPROVEMENT OF THE ELEMENTS OF WELDED STRUCTURES OF BUILDINGS AND ENGINEERING FACILITIES .....	67
<b>V.P.Korolyov, R.G.Tolstyakov.</b> PRINCIPLES OF RATING THE CHARACTERISTICS OF CORROSION STRENGTH AND FATIGUE LIFE DURING CALCULATION BY LIMITING STATES .....	68
<b>V.I.Stolbov.</b> REDUCTION OF EXPLOSION HAZARD OF WELDED PIPELINES .....	68
<b>A.I.Gedrovich, A.B.Zhidkov.</b> WELDING OF SHEET STRUCTURES WITH A FORCED COOLING .....	69
<b>V.Yu.Ataev, A.A.Mukhammedov, M.A.Abralov.</b> INCREASE IN LIFE OF STEAM PIPING OF 15Kh1M1F STEEL RECOVERED BY HEAT TREATMENT .....	70
<b>A.Yu.Bondarenko.</b> PREDICTION OF LIFE OF CRITICAL WELDED STRUCTURES AT THE STAGE OF SERVICE .....	71

# TECHNOLOGIES, EQUIPMENT AND MATERIALS FOR WELDING, SURFACING, BRAZING, CUTTING AND COATING

<b>Apasov A.M.</b> STUDY OF THE PROCESS OF AFFECTING STRUCTURE OF AUSTENITIC STEELS BY PULSED LASER RADIATION .....	75
<b>A.M. Apasov, E.V. Kozlov.</b> STRUCTURE OF AUSTENITIC STEEL WELDS .....	75
<b>Apasov A.M.</b> MECHANISM OF FRACTURE OF WELDED JOINTS DURING WELDING .....	76
<b>B.N. Badjanov.</b> SOME PROBLEMS OF TECHNOLOGY OF WELDING ADVANCED STRUCTURES .....	77
<b>V.P. Bereziienko, F.G. Lovshenko.</b> SERVICEABILITY OF RESISTANCE SPOT WELDED JOINTS .....	78
<b>N.Yu. Bord, V.A. Artyukhov, O.F. Minchenko.</b> GAS-THERMAL SYNTHESIS OF HARD MASTER ALLOYS USING HARD CARBURIZERS .....	80
<b>N.Yu. Bord, V.A. Artyukhov, O.F. Minchenko.</b> OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF DEPOSITED METAL BY THE METHODS OF GAS-THERMAL SYNTHESIS .....	81
<b>L.G. Voroshnin, L.A. Antoshina.</b> APPLICATION OF HYDROTHERMAL TREATMENT OF ZINC POWDER FOR RECONDITIONING OF PROTECTIVE COATINGS ON WELDED JOINTS .....	82
<b>E.D. Gavrilenko.</b> EXAMINATION OF QUALITY OF FORMATION OF FILLET WELDS IN ROBOTIC WELDING OF THREE- DIMENSIONAL SHIP HULL SECTIONS .....	83
<b>E.D. Gavrilenko, S.M. Samokhin, Yu.V. Solonichenko.</b> EXPERIENCE OF USING GAS-SHIELDED WELDING AT SHIP YARDS OF UKRAINE .....	84
<b>A.A. Gierzer.</b> BASIC EQUATIONS OF THE WELDING TRANSFORMER .....	85
<b>V.V. Golovko.</b> PULSED SUBMERGED-ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEELS .....	86
<b>V.F. Demchenko, O.G. Levchenko, V.A. Metlitsky, S.S. Kozlitina.</b> INFORMATION-COMPUTATION SYSTEM FOR HYGIENIC CHARACTERISTICS OF WELDING AEROSOLS .....	88
<b>V.V. Dmitrik, A.N. Pashchenko.</b> DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT COATINGS FOR PREVENTION OF CONTAMINATION OF NOZZLES WITH SPATTERS FORMED IN CO <sub>2</sub> WELDING .....	89
<b>S.V. Dragan, E.D. Gavrilenko, Yu.V. Solonichenko.</b> TECHNOLOGICAL ASPECTS OF SELECTION OF A SENSOR SYSTEM FOR ROBOTIC HARDWARE USED FOR WELDING SHIP STRUCTURES .....	90
<b>M.L. Zhadkevich.</b> HIGH-TEMPERATURE HARDENING AND WEAKENING OF METALS AND ALLOYS .....	91
<b>K.I. Zaitsev.</b> CONSTRUCTION OF FIELD PIPELINES OF BIPOLYMERIC PIPES .....	92
<b>A.Ya. Ishchenko, A.A. Bondarev, Andr.A. Bondarev.</b> ADVANCED TECHNOLOGIES FOR WELDING THIN-WALLED STRINGER STRUCTURES .....	93
<b>A.Ya. Ishchenko, V.F. Demchenko, V.P. Budnik, S.S. Kozlitina.</b> EXPERT DESIGN SYSTEM FOR TECHNOLOGIES OF WELDING LIGHT ALLOYS .....	94
<b>E.N. Kablov, V.I. Lukin, L.I. Sorokin.</b> WELDABILITY OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS USED IN AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES .....	95
<b>D.M. Kaleko.</b> ARC-CONTACT WELDING OF EXPANSION BOLTS .....	97
<b>O.E. Kapustin.</b> SCIENTIFIC-AND-TECHNICAL PRINCIPLES FOR ASSURING RELIABILITY AND SAFETY OF WELDING EQUIPMENT AND GAS FEED SYSTEMS USED FOR FLAME TREATMENT OF METAL STRUCTURES .....	97
<b>V.I. Kolosov, P.A. Gorelikov, R.A. Musin.</b> EFFECT OF ELECTRODE COMPRESSION FORCE ON FORMATION OF THE WELD NUGGET IN RESISTANCE WELDING .....	98
<b>A.N. Kornienko, N.A. Makarenko.</b> SOLUTION OF THE PROBLEM OF CONSTRICTED ARC WELDING OF STRUCTURES MADE FROM BILLETS WITH ASYMMETRIC HEAT REMOVAL .....	99
<b>P.M. Korolkov.</b> ADVANCED METHODS FOR LOCAL HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS IN LARGE-DIAMETER PIPELINES .....	100
<b>A.E. Korotytsky.</b> EQUIPMENT BASED ON RESONANCE CYCLOCONVERTERS FOR ARC WELDING .....	101

<b>O.G.Kuzmenko.</b> CONTROL OF COMPOSITION AND STRUCTURE OF DIE STEEL DURING ELECTROSLAG CLADDING USING NON-COMPACTED MATERIALS .....	102
<b>Yu.G.Kutsan, M.L.Zhadkevich.</b> SOLUTION OF TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF ELECTRON BEAM WELDING USING COMPUTER MODELLING AND MICROPROCESSOR-BASED CONTROL .....	103
<b>S.I.Kuchuk-Yatsenko, L.I.Markashova, P.N. Chvertko, E.N.Berdnikova, I.N.Mosendz, A.V.Bondaruk.</b> STRUCTURAL POSSIBILITIES FOR IMPROVING PROPERTIES OF DISSIMILAR WELDED JOINTS UNDER CONDITIONS OF FLASH BUTT WELDING .....	104
<b>V.A.Lebedev, V.G.Pichak.</b> HIGH-EFFICIENCY MECHANIZED ARC WELDING EQUIPMENT FOR JOINING METAL STRUCTURES .....	105
<b>L.I.Markashova, G.M.Grigorenko, V.V.Arsenyuk.</b> PRESSURE WELDING. STRUCTURE AND PROPERTIES OF JOINTS IN DISSIMILAR METALS .....	106
<b>L.I.Markashova, L.S.Kireev.</b> STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS OCCURRING IN THE CONTACT ZONE DURING DIFFUSION BONDING OF POROUS-MONOLITHIC PRODUCTS ON Ti-N BASE .....	107
<b>V.V.Melyukov, K.V.Ivanov-Polsky.</b> DETERMINATION OF OPTIMAL HEAT SOURCE AT PRESET FRONTS OF MELTING AND SOLIDIFICATION .....	108
<b>V.M.Mozok, A.E.Korotynsky.</b> MECHANIZED WELDING IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS .....	109
<b>N.V.Novik.</b> INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE OF THE HAZ OF FLASH BUTT WELDED JOINTS IN CARBON STEELS .....	110
<b>A.S.Pavlov, V.I.Zakharov.</b> ELECTRON BEAM WELDING OF HYDRAULIC CYLINDERS OF HEAT-HARDENED HIGH-STRENGTH STEELS .....	111
<b>N.I.Pinchuk, V.A. Matveev.</b> EXPERIENCE OF REPAIR WELDING OF TURBINE BLADES USED IN GAS-PUMPING PLANTS .....	112
<b>S.P.Ragunovich, V.K.Sheleg, V.A.Tsyganov.</b> STABILITY OF THE PROCESS OF LOW-AMPERAGE CONSTRICTED ARC WELDING OF LONG SHEET STRUCTURES .....	114
<b>A.A.Radchenko.</b> IMPACT OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC EFFECTS ON THE TECHNOLOGY OF ELECTROSLAG CLADDING OF COATINGS AND THEIR PROPERTIES .....	115
<b>M.V.Radchenko, V.G.Radchenko, Yu.O. Shevtsov.</b> ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES USED IN WESTERN-SIBERIAN REGION OF RUSSIA FOR PRODUCTION OF PROTECTIVE COATINGS .....	116
<b>N.G.Rempe, L.A.Volkov, R.D.Pchelkin.</b> DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ELECTRON BEAM WELDING BY THE METHODS OF STATISTICAL MODELLING .....	117
<b>N.G.Rempe, A.A.Kislitsky, N.V.Onuchin.</b> STABILITY OF PARAMETERS OF ELECTRON GUNS WITH PLASMA CATHODES UNDER CONDITIONS OF AUTOMATED IN-LINE WELDING PRODUCTION .....	118
<b>N.G.Rempe, I.V. Osipov, O.E.Troyan.</b> GUN WITH PLASMA CATHODE FOR ELECTRON BEAM WELDING .....	119
<b>I.L.Rovensky, N.I.Pinchuk.</b> NEW CAPABILITIES OF THE TECHNOLOGY OF WELDING GAS TURBINE ROTORS MADE FROM NICKEL ALLOYS .....	120
<b>A.I.Rozhkov, A.A.Radchenko.</b> APPLICATION OF ELECTROSLAG TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURE OF COLD UPSETTING DIES .....	122
<b>E.N.Rumyantsev, V.O.Tokarev.</b> SELECTION OF ADAPTIVE ALGORITHM TO CONTROL THE EBW PROCESS .....	123
<b>V.R.Ryabov, A.G.Yasinsky.</b> WELDING OF A MAGNESIUM-BASED FIBROUS COMPOSITE MATERIAL .....	124
<b>S.M.Samokhin.</b> PHYSICAL-METALLURGICAL COMPATIBILITY AND LAWS OF INTERACTION IN BRAZING DISSIMILAR METALS .....	124
<b>S.B.Sapozhkov, K.I.Tomas, V.T.Fedko.</b> INVESTIGATION OF INTERACTION OF SPATTERS OF MOLTEN METAL WITH A SURFACE OF WORKPIECE BEING WELDED IN CO <sub>2</sub> WELDING .....	126
<b>Yu.N.Saraev, O.I.Shpigunova.</b> ALGORITHMS OF PULSED CONTROL OF WELDING PROCESS FOR CONSTRUCTION AND REPAIR OF MAIN GAS AND OIL PIPELINES .....	127

<b>B.F.Sovetchenko, O.I.Khazanov, N.A.Azarov.</b> APPLICATION OF SUPERPLASTICITY EFFECT OF HIGH-SPEED STEEL IN FRICTION WELDING OF BIMETAL BILLETS OF TAPS .....	129
<b>B.P.Tatarin, V.Yu.Mastenkov.</b> APPLICATION OF TWIN-ELECTRODE SUBMERGED-ARC SURFACING FOR IMPROVEMENT OF QUALITY OF WELDED STRUCTURES .....	129
<b>V.O.Tokarev, E.N.Rumyantsev.</b> PROTECTION OF A CATHODE UNIT OF WELDING GUN IN LOW-VACUUM EBW .....	130
<b>K.I.Tomas, S.B.Sapozhkov, V.T.Fedko.</b> COMPOSITION OF COATING FOR PROTECTION OF SURFACE OF PRODUCTS FROM MOLTEN METAL SPATTERS IN CO <sub>2</sub> WELDING .....	131
<b>Y.Fujita, Yu.Manabe, S.Zenitani, S.Urakawa.</b> DEVELOPMENT OF 2 WIRES TIG WELDING WITH ELECTROMAGNETICALLY CONTROLLED MOLTEN POOL PROCESS .....	132
<b>V.F.Khorunov, S.V.Maksimova, I.V.Zvolinsky, M.S.Samokhin.</b> BRAZING OF HIGH-ALLOYED NICKEL ALLOYS USING ARC HEATING .....	133
<b>V.F.Khorunov, O.M.Sabadash, V.S.Kuchuk-Yatsenko.</b> TECHNOLOGY OF ALUMINIUM-STEEL BRAZING .....	134
<b>V.A.Tsyganov, S.P.Ragunovich, S.P.Torpachev.</b> CONTROL OF PROCESSES OF ARC WELDING SHEET STRUCTURES ON THE BASIS OF ARC DYNAMIC CHARACTERISTICS .....	136
<b>V.A.Tsyganov, A.G.Timonovich.</b> STABILIZING OF MICROSTRUCTURE OF JOINTS IN FUSION WELDING WITH CAVITATION EFFECT IN THE FIELD OF ULTRASOUND .....	137
<b>Ya.P.Chernyak.</b> RESTORATION SURFACING OF WORN-OUT TRAM RAILS .....	138
<b>V.V.Chigarev, K.A.Kondrashov.</b> TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF PLASMA MIG SURFACING .....	139
<b>A.A.Shulzhenko, S.A.Klimenko, Yu.A.Mukovoz.</b> TREATMENT OF MACHINE PARTS AFTER SPRAYING AND SURFACING USING TOOLS OF POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIALS .....	140
<b>Yu.D.Shchitsyn, Yu.M.Tytkin, V.Yu.Shchitsyn, O.A.Kosolapov.</b> IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PLASMA WELDING OF NONFERROUS METAL AND COMPLEX-ALLOYED ALLOYS .....	141
<b>K.A.Yushchenko, A.A.Bondarev, T.M.Starushchenko, V.M.Radzievsky, G.M.Shelenkov.</b> TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF BRAZED-WELDED HEAVY-LOADED IMPELLERS OF CENTRIFUGAL COMPRESSORS .....	142
<b>K.A.Yushchenko, D.V.Kovalenko, I.V.Kovalenko, V.A.Pestov.</b> WELDING OF HIGH-ALLOYED STEELS AND NICKEL ALLOYS USING ACTIVATED FLUXES .....	143
<b>K.A.Yushchenko, V.S.Savchenko, A.A.Nakonechny.</b> PLASMA-POWDER WELDING OF METALLIC AND COMPOSITE MATERIALS .....	144
<b>V.S.Rylnikov, A.P.Shatov, V.I.Tsarev.</b> TECHNOLOGY FOR REPAIR OF NOZZLE BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES .....	144
<b>M.N.Sivtsev, O.I.Sleptsov.</b> DEVELOPMENT OF WELDING CONSUMABLES FOR ENSURING RELIABILITY OF WELDED STRUCTURES AT LOW TEMPERATURES .....	145
<b>N.G.Efimenko.</b> INTEGRATED EVALUATION OF YTTRIUM EFFECT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON STEEL USED FOR WELDED STRUCTURES .....	146

#### CERTIFICATION OF PRODUCTS OF WELDING INDUSTRY AND ATTESTATION OF SPECIALISTS

<b>L.S. Denisov.</b> PARAMETRIC MODELS IN QUALITY SYSTEMS ADAPTED TO THE ISO 9000 REQUIREMENTS .....	151
<b>L.S. Denisov.</b> CERTIFICATION AND QUALITY OF PRODUCTS OF WELDING INDUSTRY IN REPUBLIC OF BELARUS .....	152
<b>L.S. Denisov, P.V.Zankovets.</b> TECHNICAL LEVEL, EXPENSES FOR QUALITY AND ACHIEVEMENT OF COMPETITIVENESS IN WELDING INDUSTRY .....	153
<b>V.V.Kolosov, A.E. Kapustin, V.K. Sheleg.</b> SYSTEM OF EDUCATION AND TRAINING OF SPECIALISTS IN THE FIELD OF X-RAY AND GAMMA-RAY CONTROL OF WELDED JOINTS .....	154
<b>V.S.Romeiko, V.E.Bukhin.</b> TRAINING OF SPECIALISTS ON DESIGNING, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF POLYMERIC PIPELINES .....	156
<b>A.A.Pyzhikova.</b> PATON'S TRADITIONS OF A PROFESSIONALISM IN THE SYSTEM OF A PROFESSIONAL EDUCATION IN RUSSIA .....	156